ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ
ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ
ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

Φυσική

Β΄ τάξη

Ενιαίου Λυκείου





Φυσική

Β′ τάξη
Ενιαίου Λυκείου

Με απόφαση της ελληνικής κυβερνήσεως τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου και του Λυκείου τυπώνονται από τον Οργανισμό Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων και διανέμονται δωρεάν.

Υπουργείο Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων
Παιδαγωγικό Ινστιτούτο

ΝΙΚΟΣ ΔΑΠΟΝΤΕΣ
ΑΝΔΡΕΑΣ ΙΩΑΝΝΟΥ ΚΑΣΣΕΤΑΣ

Φυσική

Β' τάξη
Ενιαίου Λυκείου

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ
ΑΘΗΝΑ

Το βιβλίο αυτό είναι εναρμονισμένο προς το ισχύον Πρόγραμμα Σπουδών για το Ενιαίο Λύκειο και έχει προκύψει από τη ριζική αναμόρφωση του σχολικού εγχειριδίου Φυσική για τηΒ′ Λυκείου ΓΕΛ ΕΠΛ ΤΕΛ των Ν. Δαπόντε, Α. Κασσέτα και Σ. Μουρίκη, έκδοση ΟΕΔΒ 1997.
Η συμμετοχή του καθηγητή Σταμάτη Μουρίκη – ενός από τους σημαντικότερους δάσκαλους της φυσικής στην Ελλάδα – στη συγγραφή του προηγούμενου εγχειριδίου, συνέβαλε καθοριστικά στην ποιότητα του βιβλίου αυτού.
Ευχαριστούμε τους δεκάδες συναδέλφους μας καθηγητές Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης και ιδιαίτερα τους υπεύθυνους των Εργαστηριακών Κέντρων Φυσικών Επιστημών οι οποίοι με τις εύστοχες παρατηρήσεις τους συνέβαλαν στην τελική διαμόρφωση του συγκεκριμένου βιβλίου.
Ευχαριστούμε επίσης τον κ. Βασίλη Ευθυμίου και την κ. Αφροδίτη Ζερβού στις φροντίδες των οποίων οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, η καλαισθησία της έκδοσης.

Περιεχόμενα





Εισαγωγή

Ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός, δύο έννοιες με μυθικό παρελθόν, αποτέλεσαν, για εκατοντάδες χρόνια, δύο διαφορετικά πεδία μελέτης τα οποία μέχρι τον δέκατο ένατο αιώνα αναπτύσσονταν ξεχωριστά κατά τρόπο που έδειχνε ότι δεν είχαν μεταξύ τους κανενός είδους συνάφεια. Η ενοποίησή τους υπήρξε προϊόν της ανακάλυψης ενιαίων νόμων, κρυμμένων κάτω από την ποικιλία των φαινομένων και οδήγησε τη φυσική σε μια καινούργια σύνθεση, τη λεγόμενη ηλεκτρομαγνητική σύνθεση.

Κατά τη μακρόχρονη πορεία προς την ενοποίηση, ένα σωρό άνθρωποι διαφόρων εθνικοτήτων έπαιξαν ουσιαστικά ρόλους «μαιευτήρων που παρευρίσκοντο σε αναπόφευκτους τοκετούς» αλλά, είτε με τη θεωρητική τους κατάρτιση, είτε με τις τεχνικές τους ικανότητες και την ξεχωριστή φαντασία τους, συνέβαλαν στο να επιταχυνθούν οι τοκετοί αυτοί αποτελεσματικά. Οι έρευνες του Γάλλου Coulomb, (Κουλόμ) του Ιταλού Volta (Βόλτα), του Δανού Oersted, (Έρστεντ), του επίσης Γάλλου Ampère (Αμπέρ), των Γερμανών Gauss (Γκάους) και Ohm (Ομ) και κύρια των Άγγλων Faraday (Φαραντέι) και Maxwell (Μάξγουελ) υπήρξαν συνεισφορές, οι οποίες σαν τους χείμαρρους που κατεβαίνουν από τα βουνά, δημιούργησαν το πλατύ ποτάμι της ηλεκτρομαγνητικής σύνθεσης.

Βασικοί σταθμοί της διαδρομής προς την τελική σύνθεση υπήρξαν η πραγματοποίηση του πειράματος Oersted, η εισαγωγή της έννοιας του πεδίου και η ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, ενώ το θεωρητικό υπόβαθρο της τελικής σύνθεσης υπήρξε έργο του James Clerk Maxwell.

Στα 1820 το πείραμα Oersted αποκάλυψε την ύπαρξη αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε μαγνήτες και ηλεκτρικά ρεύματα και δημιούργησε τη βάσιμη υποψία για κάποιο κοινό στοιχείο ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό. Η έρευνα των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων που ακολούθησε, φανέρωσε μια ακόμη αδυναμία του νευτωνικού πρότυπου. Ο Faraday, υποκαθιστώντας την έννοια «δύναμη από αποσταση» με την ευφυέστατη σύλληψη του πεδίου δυνάμεων, υπήρξε ουσιαστικά ο πρώτος που αμφισβήτησε τη νευτωνική δυναμική. Στο επίπεδο των εφαρμογών, ανυπολόγιστης αξίας υπήρξε η ανακάλυψη στα 1831, από τον Faraday, του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ήταν μια ανακάλυψη που έδειξε στον άνθρωπο τον τρόπο να παράγει ηλεκτρισμό σε μεγάλη κλίμακα, **ένα γεγονός που θα άλλαζε ριζικά όχι μόνο τον τρόπο εργασίας και διαβίωσης αλλά και αυτήν ακόμα τη**

νοοτροπία του. Μερικές δεκαετίες αργότερα ο Maxwell, δίνοντας μέσα από τέσσερις μόνο εξισώσεις το σύνολο της νομοτέλειας του ηλετρομαγνητισμού, έδειξε ότι οι διαταραχές που συνιστούν το ενιαίο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο διαδίδονται στον χώρο με κύματα, τα οποία έχουν την ίδια ταχύτητα και τον ίδιο χαρακτήρα με το φως. Έτσι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός αφού «αρραβωνιάστηκαν» μεταξύ τους, ενώθηκαν στη συνέχεια και με το φως.

Γράψαμε το βιβλίο αυτό με την επίγνωση ότι τα βιβλία φυσικής κάθε εποχής δεν πρέπει να κηρύσσουν το τέλος της ιστορίας της ανθρώπινης σκέψης και την αποκάλυψη μιας αλήθειας αιώνιας και αναντίρρητης. Τον δέκατο όγδοο αιώνα η επιστήμη εξαφάνισε οριστικά το «χέρι του Δία» από την αιτία του κεραυνού. Πριν από μερικές δεκαετίες εξαφάνισε τις μαγνητικές ποσότητες και έβαλε στη θέση τους ηλεκτρικά φορτία κινούμενα. Ποιος μπορεί να ισχυριστεί ότι το ηλεκτρικό φορτίο θα υπάρχει οπωσδήποτε στα λεξιλόγια των αιώνων που έρχονται;

Στη διδασκαλία της περασμένης τάξης κυριάρχησε η νευτωνική σύνθεση, η θερμοδυναμική και οι αντίστοιχες πρωταγωνίστριες έννοιες δύναμη και ενέργεια. Στη δευτέρα τάξη του Λυκείου, το κεντρικό θέμα θα είναι η ηλεκτρομαγνητική σύνθεση.

Πιστεύουμε ότι αξίζει τον κόπο να ασχοληθεί κανείς με τον ηλεκτρομαγνητισμό. Γιατί δεν είναι μόνο ο διακόπτης που πατάμε για να ανάψει το φως. Ο ηλεκτρομαγνητισμός είναι ένα πράγμα κυριολεκτικά συνυφασμένο με τον τρόπο που ζούμε και η εξάρτησή μας απ' αυτόν μέσα από το φως που μας δίνει τ' απογεύματα, μέσα από την τηλεοπτική εικόνα, το ανέβασμα των ασανσέρ ή την ενεργειακή τροφοδοσία της βιομηχανίας μας, δημιουργεί ένα πειστικό επιχείρημα για την αναγκαιότητα να τον γνωρίσουμε. Δεν είναι βέβαια το μοναδικό. Για όσους τουλάχιστον νιώθουν την ανάγκη να αναρωτηθούν για τη δομή και τις λειτουργίες της ύλης και να επιδιώξουν να την κατανοήσουν, η γνωριμία και η εξοικείωση με τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα συνιστούν προϋποθέσεις απαραίτητες.

Ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις



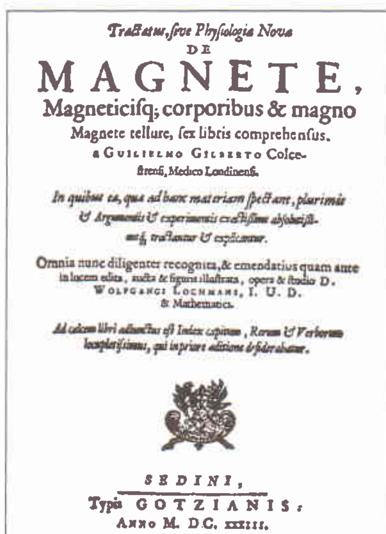
Ήλεκτρο και μαγνήτης • Ο ηλεκτρισμός • Το ηλεκτρικό φορτίο υπεύθυνο για τις αλληλεπιδράσεις • Το ηλεκτρικό φορτίο άγεται • Μια μηχανή για την «παραγωγή» φορτίου. • Ο νόμος του Coulomb • Ο μαγνητισμός • Οι ιδιότητες των μαγνητών • **Η έννοια *πεδίο*** • Πεδίο και δράση από απόσταση • Περιγραφή ενός πεδίου • Το ηλεκτρικό πεδίο • Ένταση ηλεκτρικού πεδίου • Τοπογραφία ενός πεδίου • Δυναμικό • Μαγνητικό πεδίο • **Το ηλεκτρικό φορτίο και η δομή της ύλης** • Ηλεκτρόνιο • Το ηλεκτρικό φορτίο στη δομή του ατόμου. • Η διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου • Ηλεκτρόνια ελεύθερα • **Το ηλεκτρικό φορτίο αποθηκεύεται** • Ο πυκνωτής • Φόρτιση και εκφόρτιση • Ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή • Επίπεδος πυκνωτής • Η χωρητικότητα • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

Ήλεκτρο και μαγνήτης

Ο ηλεκτρισμός

Ηλεκτρικό θα πει κάτι που έχει σχέση με ήλεκτρο. Πράγματι στην κοινή άκρη του νήματος όλων των ηλεκτρικών γεγονότων υπάρχει το κεχριμπάρι, το ημιδιαφανές στερεό υλικό το οποίο στην αρχαία ελληνική γλώσσα λεγόταν *ήλεκτρον*. Προέρχεται από ρετσίνι κωνοφόρων δένδρων το οποίο στη διάρκεια αιώνων σκλήρυνε. Σε καθαρή κατάσταση είναι η όμορφη πέτρα που χρησιμοποιούμε στα κομπολόγια μας.

Οι Ίωνες* θα πρέπει να ήταν οι πρώτοι που διαπίστωσαν τη γνωστή παράξενη ιδιότητα που αποκτά το ήλεκτρο – ύστερα από την τριβή του με ένα κομμάτι ύφασμα– να έλκει μικρά ελαφρά αντικείμενα. Παρόλο που η σημασία της λέξης *ηλεκτρισμός* έχει σήμερα διευρυνθεί, μπορούμε να δεχτούμε ως αρχική σημασία της την ιδιότητα που παρουσιάζει το κεχριμπάρι ύστερα από τριβή.



Tractatus, sive Physiologia Nova
DE
MAGNETE,
Magneticisq; corporibus & magno
Magnete tellure, sex libris comprehensus.
a GUILIELMO GILBERTO Colcestrensi, Medico Londinensi.

In quibus ea, quae ad hanc materiam spectant, plurimis & Argumentis & experimentis exactissime absolutissimeq; tractantur & explicantur.

Omnia nunc diligenter recognita, & emendatius quam ante in lucem edita, aucta & figuris illustrata, opera & studio D. WOLFGANGI LOCHMANS, I. U. D. & Mathematici.

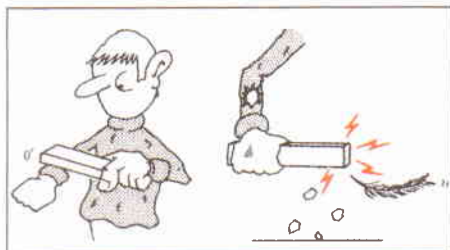
Ad calcem libri adjunctus est Index capitum, Rerum & Verborum locupletissimus, qui in priore editione desiderabatur.

SEDINI,
Typis GOTZIANIS:
ANNO M. DC. XXXIII.

Οι Έλληνες φαίνεται πως αδιαφόρησαν για τον ηλεκτρισμό. Αλλά και ολόκληρη η ανθρωπότητα κατά τις δύο χιλιετίες που ακολούθησαν δεν έδειξε να συγκινείται από αυτόν. Το επόμενο ορόσημο στην εξέλιξη των ιδεών για τον ηλεκτρισμό εμφανίστηκε μόλις στα 1600 μετά Χριστόν. Ήταν το περίφημο σύγγραμμα *Περί μαγνητών* –De Magnete– μέσα στο οποίο ο William Gilbert (Ουίλιαμ Γκίλμπερτ), ο συγγραφέας του, ισχυρίζεται ότι η παράξενη ιδιότητα του ήλεκτρου εκδηλώνεται και σε άλλα σώματα όπως το γυαλί, το θειάφι, το ρετσίνι, το βουλοκέρι, το διαμάντι και ο αμέθυστος. Ο Gilbert θα δημιουργήσει και την καινούργια λέξη *ηλεκτρικά* για να χαρακτηρίσει όλα τα υ-

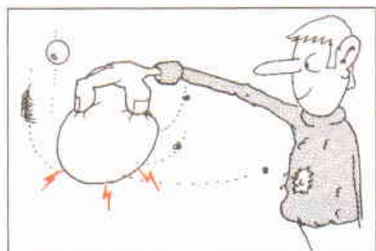
---

** Φαίνεται ότι ο πρώτος άνθρωπος που έδειξε ενδιαφέρον για τις ελκτικές δυνατότητες του ήλεκτρου ήταν ο Θαλής ο Μιλήσιος. Πολλοί ιστορικοί της επιστήμης το αποσιωπούν. Ο John Bernal γράφει σχετικά «Ο ηλεκτρισμός είχε ένα μακρύ και μυθικό παρελθόν. Από τους παλιότερους χρόνους που γνωρίζουμε οι άνθρωποι θησαύριζαν το ήλεκτρο και ίσως είχαν παρατηρήσει ότι μπορούσε ύστερα από τριβή να έλκει μικρά σώματα. Ήταν φυσικό να δουν και την αναλογία ανάμεσα σ' αυτήν και την πολύ ισχυρότερη δύναμη του μαγνήτη. Ήταν επίσης φυσικό να ενσωματώνουν τα δύο φαινόμενα στη γενική μαγική σκέψη των αρχαίων χρόνων».*



λικά που συμπεριφέρονται όπως το ήλεκτρο. Ένας σημερινός κατάλογος θα μπορούσε να συμπληρωθεί με την πορσελάνη, το νάιλον, το λάστιχο, το πλεξιγκλάς, τα πλαστικά, το καουτσούκ, τη μίκα, τα κεραμικά, αλλά κι όχι μόνο με αυτά. Για να είναι πλήρης θα έπρεπε να συμπεριλαμβάνει όλα τα σώματα που σήμερα λέγονται διηλεκτρικά ή μονωτές.

Η καθημερινή εμπειρία. Η σκόνη που μαζεύεται στο δίσκο καθώς παίζει το πικάπ, το τίναγμα που νιώθει ο οδηγός αγγίζοντας το αμάξωμα του αυτοκινήτου, οι γνωστοί εκείνοι θόρυβοι που ακούμε και οι μικρές σπίθες που βλέπουμε καθώς βγάζουμε το νάιλον πουκάμισό μας ενώ ταυτόχρονα το νιώθουμε να κολλάει στο σώμα μας, είναι γεγονότα ηλεκτρικά, δηλαδή σαν αυτά που συμβαίνουν μετά από την τριβή του ήλεκτρου. Αν χρησιμοποιήσουμε και τον όρο *ηλέκτριση* ως διαδικασία κατά την οποία ένα σώμα αποκτά ηλεκτρισμό μπορούμε να πούμε ότι στο δίσκο του πικάπ, στο μεταλλικό αμάξωμα του αυτοκινήτου και στο νάιλον πουκάμισο συνέβη ηλέκτριση με τριβή.

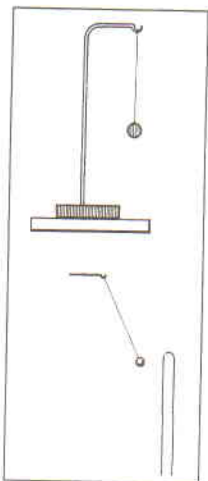


Οι φυσικοί βέβαια δεν μένουν στην τυχαία παρατήρηση. Αναπαράγουν τα γεγονότα στο εργαστήριο, οργανώνουν τις παρατηρήσεις τους, φτιάχνουν καινούργιες συσκευές, δημιουργούν καινούργιες έννοιες, εμπλουτίζουν τη γλώσσα τους, επιστρατεύουν τα μαθηματικά, ανατρέχουν στη γνώση που προϋπάρχει, εκτελούν πειράματα, μετρούν, καταγράφουν και αποδελτιώνουν τα μηνύματα και καταλήγουν σε συμπεράσματα τα οποία τολμούν και γενικεύουν αποκαλώντάς τα **νόμους.**

Η εργαστηριακή εμπειρία. Ο ηλεκτρισμός, λοιπόν, ξεκίνησε αποκλειστικά και μόνο με έλξεις σαν αυτές που αναφέραμε. Όπως κάνουν και οι φυσικοί μπορούμε να τις αναπαραγάγουμε στο εργαστήριο, να τις παρατηρήσουμε περισσότερο μεθοδικά και να αναζητήσουμε και κάποια ποσοτική προσέγγιση.

Για να τα καταφέρουμε θα χρειαστούμε ειδικές συσκευές και επιστημονικές έννοιες. Οι συσκευές θα μας εξυπηρετήσουν στο να αναπαράγουμε τα γεγονότα με τον τρόπο που θέλουμε εμείς. Οι έννοιες μάς είναι απαραίτητες στο να περιγράψουμε αυτά που θα διαπιστώσουμε στη γλώσσα της επιστήμης. Η έννοια η οποία προς

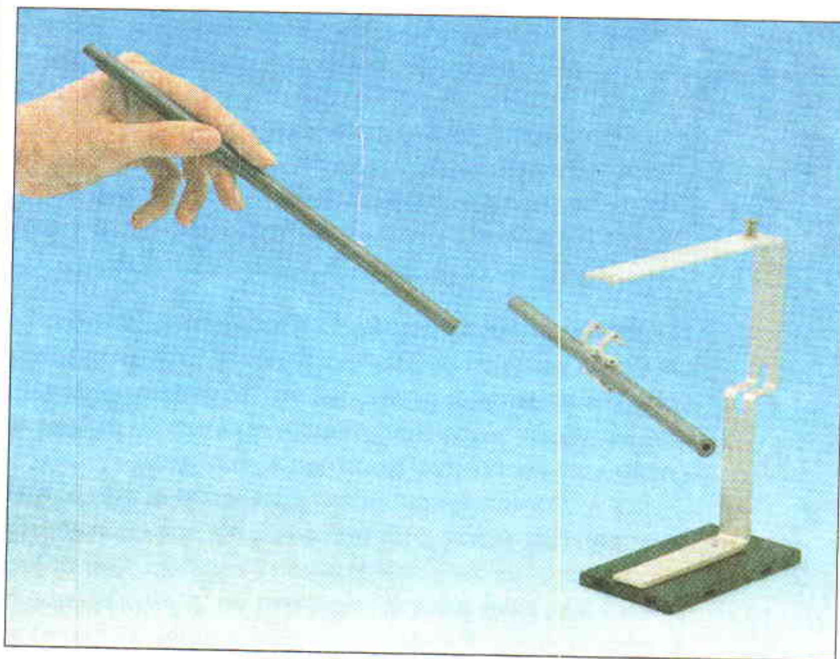
το παρόν θα μας χρειαστεί είναι η «νευτωνική» δύναμη.



Η ηλεκτρική έλξη θα είναι μία δύναμη που θα μπορέσουμε να τη συγκρίνουμε με άλλες δυνάμεις γνωστές. Μια συσκευή που θα μας επιτρέψει να ανιχνεύσουμε αν ένα σώμα είναι ηλεκτρισμένο, αλλά και να εκμαιεύσουμε ποσοτικά συμπεράσματα είναι το λεγόμενο ηλεκτρικό (ή ηλεκτροστατικό) εκκρεμές. Είναι ένα ελαφρύ σφαιρίδιο από κουφοξυλιά, φελιζόλ, είτε αλουμίνιο, κρεμασμένο με λεπτό μεταξένιο νήμα από μονωτικό υποστήριγμα. Αν πλησιάσουμε την άκρη μιας γυάλινης ηλεκτρισμένης ράβδου, η γωνία κατά την οποία θα αποκλίνει το νήμα από την κατακόρυφο, καθώς το σφαιρίδιο θα ισορροπεί κάτω από την επίδραση της ηλεκτρικής έλξης –δύναμης, του βάρους του και της δύναμης του τεντωμένου νήματος θα μας βοηθήσει να φτάσουμε σε κάποιο συμπέρασμα για την τιμή της ηλεκτρικής έλξης-δύναμης.

Ερευνώντας πειραματικά την ηλέκτριση των σωμάτων και τις μορφές αλληλεπίδρασης καταλήγουμε σε συγκεκριμένα συμπεράσματα τα οποία γενικεύουμε.

1. *Μπορούμε να ηλεκτρίσουμε ένα σώμα*
   α. εάν το τρίψουμε με ένα κομμάτι ύφασμα είτε
   β. εάν το ακουμπήσουμε σε ένα ήδη ηλεκτρισμένο σώμα.
2. *Δύο ηλεκτρισμένα σώματα αλληλεπιδρούν. Η αλληλεπίδρασή τους εκδηλώνεται είτε με έλξη είτε με άπωση.*



Το ηλεκτρικό φορτίο υπεύθυνο για τις αλληλεπιδράσεις

Οι δύο ηλεκτρισμοί. Χρειάζεται ίσως να τονίσουμε ότι η έλξη και η άπωση είναι δύο γεγονότα εντελώς διαφορετικά. Αυτό είναι κάτι που δεν συμβαίνει με τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες είναι μόνο ελκτικές. Η παρατήρηση για δύο διαφορετικούς τύπους ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων γέννησε και την ιδέα για την ταξινόμηση των σωμάτων σε δύο ομάδες. Σύμφωνα με αυτήν τα σώματα, όταν ηλεκτρίζονται, α) εφόσον απωθούνται ανήκουν στην ίδια ομάδα β) εφόσον έλκονται δεν ανήκουν στην ίδια ομάδα.

Τον 18ο αιώνα ο Γάλλος Dufay (Ντιφέ) διατείνεται ότι σε καθεμιά απ' αυτές τις ομάδες εμφανίζεται ένα διαφορετικό είδος ηλεκτρισμού. Μιλάει, δηλαδή, για δύο ηλεκτρισμούς, τους οποίους ονομάζει *υαλώδη* και *ρητινώδη*, ενώ παράλληλα θεωρεί απίθανη την ύπαρξη ενός τρίτου είδους ηλεκτρισμού.

Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων. Τον ίδιο αιώνα γεννήθηκε και η ιδέα ότι κατά την ηλέκτριση *οποιουδήποτε* σώματος εμφανίζεται *«κάτι»* το οποίο ονομάζεται ηλεκτρικό φορτίο.

Το φορτίο είναι «κάτι», το οποίο δεν το είδε ποτέ κανείς. Δεν έχει βάρος ούτε χρώμα ούτε διαστάσεις. Στο ερώτημα «*τι ονομάζεται ηλεκτρικό φορτίο*» δεν μπορούμε να δώσουμε απάντηση. Όπως συμβαίνει και μ' άλλες έννοιες δεν είναι δυνατόν να το ορίσουμε, να το περιγράψουμε, δηλαδή, με όρους απλούστερους. Προς το παρόν, το φορτίο θα είναι για μας κάτι το οποίο εμφανίζεται στα ηλεκτρισμένα σώματα και το οποίο ευθύνεται για τις ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις. Αντί να θεωρούμε ότι το ένα ηλεκτρισμένο σώμα ασκεί δύναμη στο άλλο, θα λέμε ότι το φορτίο του ενός ασκεί δύναμη στο φορτίο του άλλου σώματος. Κάτι ανάλογο έγινε και με τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις, στις οποίες η ευθύνη αποδόθηκε στη βαρυτική μάζα του κάθε σώματος.

Φορτίο θετικό και φορτίο αρνητικό. Η ιδέα του Dufay για δύο είδη ηλεκτρισμού μετεξελίχθηκε σε ιδέα για δύο τύπους ηλεκτρικού φορτίου, το *θετικό* και το *αρνητικό,* σε τρόπο ώστε τα ομώνυμα φορτία να απωθούνται και τα ετερώνυμα να έλκονται.

Το θετικό φορτίο είναι ο κληρονόμος του υαλώδους ηλεκτρισμού. *Θετικό ονομάζουμε το φορτίο που εμφανίζεται στο γυαλί, όταν το τρίψουμε με μεταξωτό ύφασμα.*

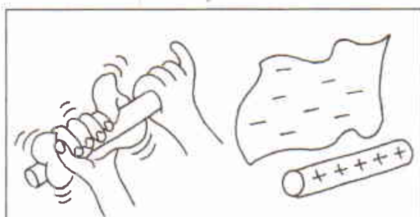
Το αρνητικό φορτίο είναι, με τη σειρά του, ο κληρονόμος του ρητινώδους ηλεκτρισμού. *Αρνητικό ονομάζουμε το φορτίο που εμφα-*

νίζεται στον εβονίτη, όταν τον τρίψουμε με μάλλινο ύφασμα.

Βλέπουμε ότι για να ορίσουμε τη θετικότητα και την αρνητικότητα του φορτίου χρησιμοποιούμε δύο ορισμένα υλικά κι αυτό δεν είναι παρά μία σύμβαση η οποία έχει επικρατήσει.

Οι λέξεις *θετικό* και *αρνητικό* που χρησιμοποιούμε για τα δύο είδη φορτίου είναι, φυσικά δανεισμένες από τη γλώσσα των μαθηματικών. Η επιλογή δεν είναι τυχαία. Βασίζεται πάνω στην εμπειρία –κι όχι μόνο σ' αυτήν– σύμφωνα με την οποία μία ποσότητα θετικού φορτίου και μία ίση ποσότητα αρνητικού όταν συνυπάρχουν στο ίδιο σώμα εμφανίζουν αποτέλεσμα «μηδέν», το οποίο φέρνει στο νου το αποτέλεσμα της πρόσθεσης ενός θετικού αριθμού με τον αντίθετό του.

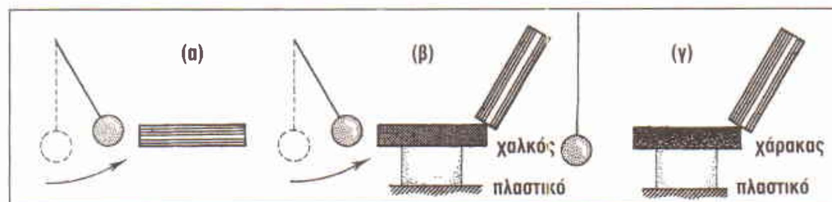
Ξέρουμε επίσης ότι αν δύο σώματα, γυαλί και μετάξι, για παράδειγμα, τριφτούν μεταξύ τους μια ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου μεταβιβάζεται από το ένα στο άλλο και η αρχική ηλεκτρική ουδετερότητα καταστρέφεται. Στην προκειμένη περίπτωση το γυαλί εμφανίζεται –εξ ορισμού– με θετικό φορτίο και το μετάξι με ίσο αρνητικό φορτίο.



Το ηλεκτρικό φορτίο άγεται

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα του ηλεκτρικού φορτίου είναι η **αγωγή.** Ήδη από τον 18ο αιώνα οι ερευνητές αντιμετώπιζαν τον ηλεκτρισμό σαν ένα αόρατο πράγμα που μπορούσε να ρέει μέσα από διάφορα σώματα –όπως οι υγροί σπάγκοι και τα μέταλλα– χωρίς να παρατηρείται μετακίνηση ύλης. Ήταν, δηλαδή, ένα αβαρές ρευστό που το έλεγαν μάλιστα *ηλεκτρικό ρευστό.* Μια ανάλογη αντίληψη επικρατούσε και για τη θερμότητα.

Στο εργαστήριο. Ας αφήσουμε όμως να μας καθοδηγήσει και πάλι το πείραμα. Πάνω σε βάση από πλαστικό βάζουμε μια ράβδο χάλκινη. Στη μια της άκρη έχουμε φροντίσει να τοποθετήσουμε ένα ηλεκτρικό εκκρεμές, το οποίο θα αποτελέσει για μας τον ανιχνευτή ηλεκτρικών φορτίων. Στην άλλη ακουμπάμε μια ηλεκτρισμένη ράβδο εβονίτη.



Αμέσως βλέπουμε το σφαιρίδιο να έλκεται από τη χάλκινη ράβδο. Αν απομακρύνουμε τη ράβδο εβονίτη η έλξη διατηρείται. Η παρατήρηση μάς οδηγεί σ' ένα λογικό συμπέρασμα. Το χάλκινο αντικείμενο ηλεκτρίστηκε με επαφή. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την έννοια *φορτίο* και να λέμε *φορτίστηκε*. Η ράβδος εβονίτη τού μεταβίβασε ηλεκτρικό φορτίο. Ηλεκτρικό φορτίο εμφανίστηκε στην άλλη άκρη και προκάλεσε την έλξη στο σφαιρίδιο του εκκρεμούς. Φαίνεται ότι η χάλκινη ράβδος *επέτρεψε τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου* μέσα απ' αυτήν. Χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο που μεταβιβάστηκε στο χάλκινο σώμα είναι απλωμένο σ' όλη την έκτασή του. Αν αντικαταστήσουμε τη χάλκινη ράβδο με άλλη από διαφορετικό μέταλλο, το φαινόμενο θα επαναληφθεί.

Αν όμως στη θέση της μεταλλικής ράβδου, χρησιμοποιήσουμε έναν πλαστικό χάρακα, το μήνυμα που παίρνουμε μάς λέει ότι στο άλλο άκρο του πλαστικού χάρακα δεν ανιχνεύεται ηλεκτρικό φορτίο. Είναι σαν το πλαστικό να εμποδίζει τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα από αυτό. Μια γυάλινη ράβδος, ένα χαρτόνι, το μετάξι, η πορσελάνη, παρουσιάζουν παρόμοια με το πλαστικό συμπεριφορά.

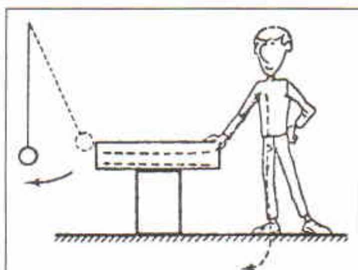
Μπορούμε να κάνουμε μια πρόχειρη ταξινόμηση των σωμάτων με κριτήριο το αν επιτρέπουν ή δεν επιτρέπουν τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα από αυτά.

Τα σώματα που επιτρέπουν τη μετακίνηση φορτίου, τα σώματα –με άλλα λόγια– μέσα από τα οποία *το ηλεκτρικό φορτίο άγεται*, λέγονται *ηλεκτρικοί αγωγοί*. Φορτίζονται με μια απλή επαφή από ένα άλλο φορτισμένο σώμα και το φορτίο που αποκτούν απλώνεται σ' όλη την έκτασή τους. Τα μέταλλα, το ανθρώπινο σώμα, η γη, είναι αγωγοί.

Μονωτές λέγονται τα σώματα που δεν επιτρέπουν τη μετακίνηση φορτίου μέσα από αυτά. Απομονώνουν, μ' άλλα λόγια, το φορτίο, όπου εμφανίζεται, σε μια περιοχή τους. Το γυαλί, το ήλεκτρο και τα άλλα υλικά που αναφέραμε είναι μονωτές.



Η διάκριση αυτή των σωμάτων σε αγωγούς και μονωτές, που προτάθηκε για πρώτη φορά κατά τις αρχές του 18ου αιώνα, στην εποχή μας θεωρείται απλουστευτική. Σήμερα λέμε ότι όλα τα υλικά εμφανίζουν κάποια ηλεκτρική αγωγιμότητα. Τα διάφορα υλικά



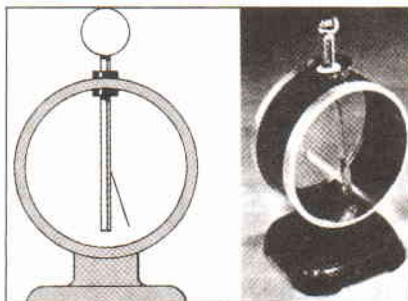
Το χάλκινο κομμάτι βρίσκεται πάνω σε βάση μονωτική και αρχικά είναι φορτισμένο. Το δείχνει η απόκλιση του εκκρεμούς-ανιχνευτή. Αν κάποιος ακουμπήσει με το χέρι του το μέταλλο, το σφαιρίδιο του εκκρεμούς επανέρχεται στην κατακόρυφη θέση. Θεωρούμε ότι ηλεκτρικό φορτίο κινήθηκε μέσα από το ανθρώπινο σώμα προς τη Γη.

μπορούμε να τα κατατάξουμε με κριτήριο την τιμής της αγωγιμότητάς τους. Θα έχουμε μια λίστα, στη μια άκρη της οποίας θα πρέπει να υπάρχει συσσώρευση αυτών που ονομάζουμε **αγωγούς** ενώ στην άλλη άκρη θα βρίσκονται οι **μονωτές.** Η αγωγιμότητα ενός μετάλλου, για παράδειγμα, θα είναι πεντάκις εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από εκείνη του γυαλιού. Σε μια γραμμή μεταφοράς το ηλεκτρικό φορτίο κινείται πολύ πιο εύκολα μέσα από εκατοντάδες χιλιόμετρα μεταλλικού σύρματος παρά μέσα από τα λίγα εκατοστά του μονωτή ο οποίος χωρίζει το σύρμα από τον πύργο που τον στηρίζει. Στο μεταξύ, στο μέσον της λίστας εμφανίζονται τα «τρομερά παιδιά» της ηλεκτρονικής επανάστασης του δεύτερου μισού του 20ου αιώνα, οι **ημιαγωγοί.**

Η Γη και ο άνθρωπος. Η Γη είναι αγωγός όπως και ο άνθρωπος. Αυτό άλλοτε μας εμποδίζει σε ορισμένες επιδιώξεις και άλλοτε μας εξυπηρετεί. Αν, για παράδειγμα, αυτό το ξεχάσουμε και θελήσουμε να ηλεκτρίσουμε ένα κομμάτι μέταλλο κρατώντας το με το χέρι και τρίβοντάς το πάνω σε ύφασμα, γρήγορα θα καταλάβουμε ότι είναι μάταιο. Δυνατότητα να πετύχουμε κάτι τέτοιο θα έχουμε μόνο αν εφοδιάσουμε το μέταλλο με μια μονωτική λαβή και το πιάσουμε απ' αυτήν. Αν δεν φροντίσουμε να κάνουμε κάτι ανάλογο, η ηλέκτριση θα ματαιώνεται, γιατί το φορτίο που «εμφανίζεται» με την τριβή μετακινείται μέσω του αγώγιμου σώματός μας προς την αγώγιμη Γη.

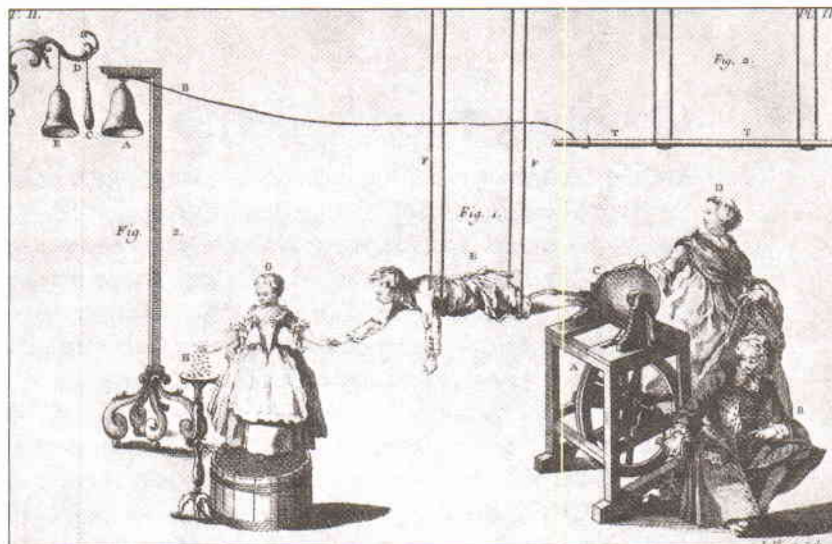
Ο αέρας. Ένα ηλεκτρισμένο αντικείμενο, αργά ή γρήγορα παύει να είναι ηλεκτρισμένο. Υπεύθυνος γι' αυτό είναι ο αέρας, ο οποίος κυρίως όταν έχει υγρασία είναι αγωγός του ηλεκτρισμού.

Μπορούμε να λέμε ότι τα φορτία δραπετεύουν από το ηλεκτρισμένο αντικείμενο στον αέρα ή ότι το αντικείμενο *εκφορτίζεται.* Τα φορτισμένα μας ηλεκτροσκόπια, όταν αφεθούν στον αέρα, εκφορτίζονται.



Το ηλεκτροσκόπιο. Το ηλεκτροστατικό εκκρεμές, το οποίο μας βοηθάει να ανιχνεύσουμε την «παρουσία» ηλεκτρικού φορτίου δεν είναι βέβαια κανένα όργανο ιδιαίτερα ευαίσθητο. Το ηλεκτροσκόπιο, ο γνωστός ανιχνευτής που υπάρχει στα σχολικά εργαστήρια, διαθέτει πολύ μεγαλύτερες δυνατό-

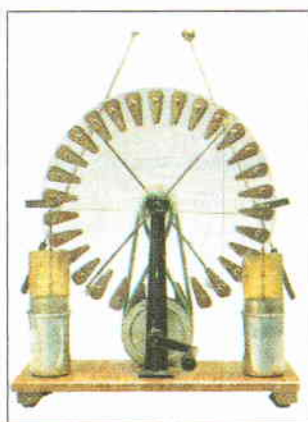
τητες. Εννοείται ότι και αυτό είναι σχετικό, δεδομένου ότι στην εποχή μας υπάρχουν ηλεκτρονικά όργανα που η ευαισθησία τους κάνει ακόμα και το ηλεκτροσκόπιο να δείχνει συγκριτικά πρωτόγονο.



Ο «καλός κόσμος» του 18ου αιώνα διασκεδάζει με τον ηλεκτρισμό.

Μια μηχανή για την «παραγωγή» φορτίων

Από τα μέσα του 17ου αιώνα οι Ευρωπαίοι άρχισαν πια να γοητεύονται από τον ηλεκτρισμό. Αρκετοί ήταν εκείνοι που προσπάθησαν να κατασκευάσουν μηχανή που θα μπορούσε να παράγει «ηλεκτρισμό» σε μεγάλες ποσότητες. Η πρώτη μηχανή αυτού του είδους –ηλεκτροστατική μηχανή– κατασκευάστηκε στα 1662 στη Γερμανία από τον Otto von Guericke (Ότто φον Γκέρικε). Βασικός της τμήμα ήταν μια σφαίρα από θειάφι σαν κεφάλι παιδιού, που στρεφόταν γύρω από άξονα και ηλεκτριζόταν. Ο πειραματιστής άγγιζε την επιφάνεια προκαλώντας ηλέκτριση με τριβή.



Η ηλεκτροστατική μηχανή Whimshurst, που συνήθως διαθέτει ένα ελληνικό σχολικό εργαστήριο, είναι απόγονος της μηχανής του Otto von Guericke.

Έχει δύο ακροδέκτες οι οποίοι, όταν η μηχανή λει-

τουργεί, φορτίζονται με φορτίο διαφορετικού τύπου. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια τέτοια μηχανή για να παίρνουμε όσες ποσότητες φορτίου θέλουμε, είτε θετικού είτε αρνητικού, χωρίς να χρειάζεται να τρίβουμε γυάλινα ή κεχριμπαρένια σώματα σε μάλλινα ή μεταξωτά υφάσματα.

Ο νόμος του Coulomb

Καθώς ξετυλίγεται ο 18ος αιώνας, ο ηλεκτρισμός –σε αντίθεση με τη Νευτωνική δυναμική– θεωρείται επιστήμη εύκολη χωρίς καθόλου μαθηματικά. Για τον πολύ κόσμο είναι ακόμα μαγικός, εκθαμβωτικός, διασκεδαστικός και παράξενος. Ως επιστήμη παραμένει ακόμα στο επίπεδο μιας συσσώρευσης πειραματικών δεδομένων και παρατηρήσεων, οι οποίες πραγματοποιούνται με συσκευές, όπως οι ηλεκτροστατικές μηχανές και οι πυκνωτές.

Όλα αυτά που συμβαίνουν περισσότερο περιγράφονται παρά ερμηνεύονται μέσα από έννοιες που έχουν στο μεταξύ επινοηθεί. Η απουσία των ποσοτικών συμπερασμάτων αρχίζει να γίνεται αισθητή. Κανένας νόμος δεν έχει ακόμα διατυπωθεί. Την ίδια εποχή οι φυσικοί «πιστεύουν» στον νόμο της παγκόσμιας έλξης παρόλο που δεν έχει μέχρι τότε αποδειχθεί πειραματικά. Η νευτωνική αυθεντία κυριαρχεί πάνω στην ευρωπαϊκή επιστημονική σκέψη και δεν αφήνει περιθώρια για αμφισβήτηση. Ανάμεσα σε δύο οποιεσδήποτε μάζες πιστεύεται οτι οπωσδήποτε ασκείται μια έλξη από απόσταση ανάλογη προς το γινόμενο των μαζών τους και αντίστροφα ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασής τους.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Το 1785 ο Γάλλος Charles Coulomb (Σαρλ Κουλόμ) ξεκίνησε την πρώτη πειραματική ποσοτική έρευνα πάνω στις ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις, η οποία καρποφόρησε και έδωσε τον πρώτο νόμο της επιστήμης του ηλεκτρισμού.



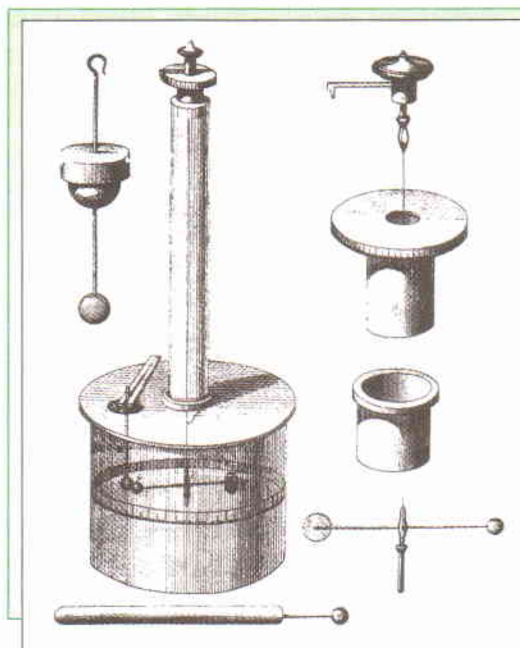
Το έργο του Charles-Augustin de Coulomb (1736-1806) χαρακτηρίζεται από μια εντυπωσιακή ισορροπία ανάμεσα στο μαθηματικό λογισμό και το πείραμα.

Το ερώτημα. Πριν από τη διατύπωση ενός φυσικού νόμου υπάρχει συνήθως ένα ερώτημα που δεν έχει ακόμα απαντηθεί. Στην περίπτωση αυτή το ερώτημα ήταν: *Οι ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις υπακούουν άραγε σε κάποιο ποσοτικό νόμο; Ποιος είναι ο νόμος αυτός;*

Η γλώσσα των εννοιών. Για να οδηγηθούν όμως οι φυσικοί σε κάποια απάντηση ήταν αναγκαία η διατύπωση του ερωτήματος με τη βοήθεια εννοιών. Η δοκιμασμένη έννοια *δύναμη* έδειχνε ικανή να

περιγράψει τις αλληλεπιδράσεις. Η καινούργια έννοια *ηλεκτρικό φορτίο* φαινόταν και αυτή κατάλληλη αν και παρουσίαζε ένα σοβαρό μειονέκτημα. *Το φορτίο ήταν «κάτι» που δεν είχε ακόμα μετρηθεί.*

Η υποψία. Λίγα χρόνια πριν ενεργοποιηθεί ο Coulomb, ο Άγγλος ερευνητής Joseph Priestley (Τζόζεφ Πρίσλεϋ) διετύπωσε μια τολμηρή ιδέα σύμφωνα με την οποία *οι ηλεκτρικές δυνάμεις ίσως να πειθαρχούσαν σε ένα νόμο ανάλογο με εκείνον της παγκόσμιας έλξης*. Ο ίδιος αδυνατούσε να επιβεβαιώσει αυτήν την υπόθεση. Η υποψία του, όμως, ενθάρρυνε άλλους ευρωπαίους φυσικούς να το επιχειρήσουν. Ο Coulomb ήταν ένας από αυτούς.

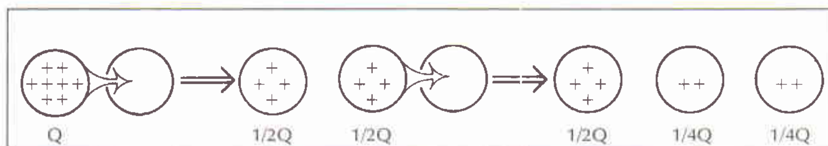


Ο «ηλεκτροστατικός ζυγός στρέψεως» του Coulomb (1785). Ρόλο δυναμομέτρου και μάλιστα λίαν ευαίσθητου παίζει το νήμα με τη ράβδο από γυαλί, δεμένη στο κάτω μέρος του. Η ράβδος φέρει μια μικρή σφαίρα μεταλλική στο άκρο της. Πρόκειται για τον λεγόμενο «ζυγό στρέψεως» με τον οποίο ο Coulomb κατάφερε να υπολογίζει το σχετικό μέτρο των ηλεκτρικών δυνάμεων. Παρόμοια συσκευή χρησιμοποιήθηκε το 1798 από τον Henry Cavendish για τη μέτρηση δυνάμεων παγκόσμιας έλξης.

Η πειραματική επιβεβαίωση. Το πρότυπο, λοιπόν, υπήρχε και ήταν αποδεκτό. Ο Coulomb, εκατό περίπου χρόνια μετά τον Νεύτωνα, χρησιμοποίησε κι αυτός την έννοια *δύναμη* με τον τρόπο που την είχε χρησιμοποιήσει και ο Νεύτων. Η πρώτη του επιδίωξη ήταν να ερευνήσει αν οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονταν ανάμεσα σε δύο μικρές φορτισμένες σφαίρες πειθαρχούσαν –όπως και οι βαρυτικές– στο νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου. Αυτό σήμαινε ότι αν για ορισμένη, μεταξύ των φορτίων, απόσταση r η δύναμη ήταν F, για απόσταση διπλάσια (2r) θα ήταν (F/4) για απόσταση τριπλάσια (3r) θα ήταν F/9 και, γενικότερα για απόσταση μr

θα ήταν F/μ^2. Ο *ζυγός στρέψεως* τον οποίον χρησιμοποίησε έδειχνε ότι κάτι τέτοιο φαινόταν πράγματι να ισχύει.
Χρειαζόταν ακόμα να ερευνήσει αν η δύναμη ήταν ανάλογη προς κάποιο γινόμενο αντίστοιχο με το γινόμενο $m_1 m_2$, των βαρυτικών μαζών. Η σκέψη του ήταν ότι στη θέση των μαζών m_1 και m_2, οι οποίες ήταν υπεύθυνες για τις βαρυτικές αλληλεπιδράσεις, έπρεπε να θεωρήσει τα ηλεκτρικά φορτία q_1 και q_2 τα οποία ήταν, με τη σειρά τους, υπεύθυνα για τις ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις.

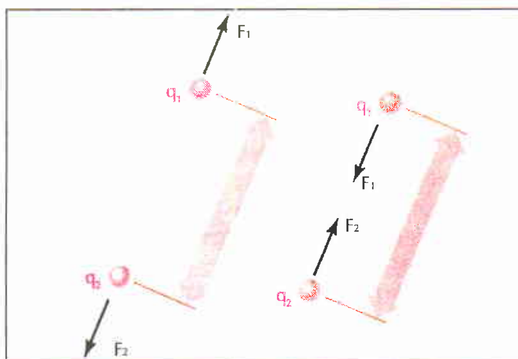
Για να καταλήξει, όμως, στο *ανάλογη προς το γινόμενο* χρειαζόταν ποσότητες φορτίου. Ο Coulomb, για να το πετύχει, χρησιμοποίησε μια τεχνική βασισμένη σε μια λογική συμμετρίας. Αξίζει να την παρακολουθήσουμε. Ας πάρουμε μια μεταλλική φορτισμένη σφαίρα κι ας υποθέσουμε ότι η ποσότητα φορτίου που περιέχει είναι q. Αν την ακουμπήσουμε σε μια εντελώς όμοια αφόρτιστη σφαίρα και μετά την επαφή τις απομακρύνουμε κάθε μία θα έχει ποσότητα q/2. Η παραδοχή του σήμερα θεωρείται σωστή. Αν στη συνέχεια ακουμπήσουμε πάλι τη μια απ' αυτές τις σφαίρες σε μια τρίτη αφόρτιστη παρόμοια σφαίρα, μετά την απομάκρυνση θα έχουν –τόσο η μία όσο και η άλλη– φορτίο q/4.



Το φορτίο, κάθε σφαίρας μετά την επαφή θα είναι το μισό του αρχικού

Συνεχίζοντας μ' αυτόν τον τρόπο θα μπορούμε να διαθέτουμε ποσότητες φορτίου q, q/2, q/4, q/8, q/16, q/32, «κουταλιές φορτίου», τις οποίες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να επιβεβαιώσουμε ότι πράγματι η δύναμη ανάμεσα σε δύο ποσότητες φορτίου q_1 και q_2 είναι ανάλογη με το γινόμενο $q_1 q_2$.
Η διατύπωση του νόμου. Παρόλο που δεν περιείχαν μεγάλη ακρίβεια, τα πειράματα του Coulomb υπήρξαν άμεσα και πειστικά. Με αφετηρία μια ερώτηση και τη διατύπωση μιας υπόθεσης προχώρησε στην επινόηση πειραματικών διατάξεων και στην καταγραφή μετρήσεων για να οδηγηθεί σε ένα συμπέρασμα που έχει ενσωματωθεί στη φυσική ως *νόμος Coulomb*. Αναφέρεται στην ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση ανάμεσα σε φορτισμένα σημειακά αντικείμενα (σημειακά φορτία).
Η ελκτική ή απωστική δύναμη ανάμεσα σε δύο σημειακά φορτία είναι ανάλογη προς το γινόμενο των φορτίων και αντίστροφα ανάλογη προς το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης.

$$F = k_{\eta\lambda} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



Έχουν περάσει πάνω από διακόσια χρόνια και ο νόμος του Coulomb εξακολουθεί να είναι αποδεκτός. Η εμπιστοσύνη των φυσικών σ' αυτόν δεν στηρίζεται στα πειράματα που έκανε ο Coulomb με το ζυγό στρέψεως. Πειράματα βασιζόμενα στη σύγχρονη τεχνολογία δείχνουν ότι ο εκθέτης του r στην παραπάνω εξίσωση βρίσκεται ανάμεσα στα όρια 2,000000002 και 1,999999998. Είναι συνεπώς εύλογο να θεωρείται ίσος με «2», όπως είχε υποστηρίξει ο Colomb.
Στο Διεθνές Σύστημα (SI) μονάδα ηλεκτρικού φορτίου θεωρείται το ένα Coulomb, που συμβολίζεται 1C. Η τιμή της σταθεράς $k_{\eta\lambda}$ για το κενό είναι 9 10^9 Nm^2/C^2. Χρησιμοποιείται επίσης η σταθερά ε_0 = $1/4\pi k_{\eta\lambda}$ = 8,85 10^{-12} $C^2/N\ m^2$ η λεγόμενη *απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού.*

Ο μαγνητισμός

...«ο μπούσουλας είναι που στρέφει ή το καράβι;»

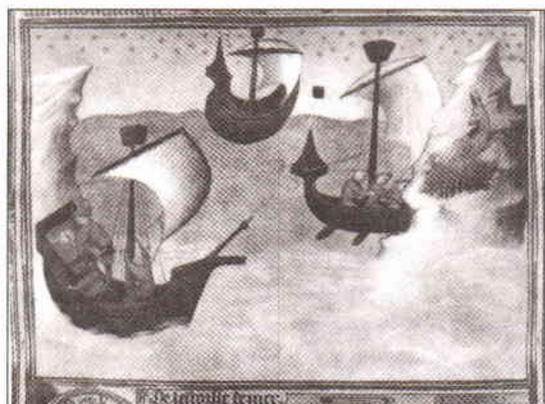
Νίκος Καββαδίας

Χιλιάδες χρόνια προτού χρησιμοποιηθεί η πυξίδα για τον προσανατολισμό πάνω στη Γη, οι άνθρωποι γνώριζαν τον *μαγνητισμό,* την ιδιότητα δηλαδή του φυσικού μαγνήτη (μαγνητόλιθου) να έλκει σιδερένια αντικείμενα. Όπως συμβαίνει και με τον ηλεκτρισμό, η έννοια *μαγνητισμός* έχει σήμερα πολύ μεγαλύτερη ευρύτητα, οπωσδήποτε όμως η ελκτική ιδιότητα του φυσικού μαγνήτη αποτελεί την πρωταρχική σημασία της.

Οι αρχικές παρατηρήσεις πάνω στα μαγνητικά φαινόμενα ήταν δύο και έδειχναν διαφορετικές. Η πρώτη ήταν η μυστηριώδης ελκτική δυνατότητα του μαγνητόλιθου. Η δεύτερη ήταν η εξίσου μυστηριώδης επιμονή ενός ελεύθερου ραβδομαγνήτη να δείχνει τον βορρά. Όπως φαίνεται από τις μέχρι σήμερα έρευνες η πρώτη απ'

αυτές τις παρατηρήσεις πρέπει να έγινε, κυρίως σε δύο περιοχές του κόσμου που απέχουν μεταξύ τους χιλιάδες χιλιόμετρα. Στην Κίνα και στην Ελλάδα.

Αντίθετα από τους Κινέζους, οι Έλληνες –όπως συνέβη και με το ήλεκτρο– δεν πρέπει να έδωσαν ιδιαίτερη προσοχή στις παραξενιές των μαγνητών.



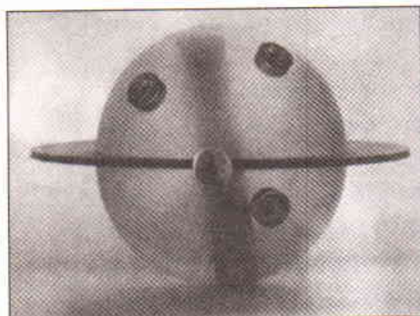
Το καράβι που βρίσκεται αριστερά, ταξιδεύει χωρίς κίνδυνο χάρη στην πυξίδα του. Το άλλο καράβι δεξιά, χάνει το δρόμο του. (Μινιατούρα από πολύ παλιό χειρόγραφο)

Τις διάφορες μαρτυρίες πάνω σ' αυτούς φαίνεται ότι ουσιαστικά τις αγνόησαν. Ακόμη και ο Αριστοτέλης, αυτό το φαινόμενο πολυμάθειας, ενώ ασχολήθηκε με τόσα πολλά ζητήματα δεν είχε ή δεν θέλησε τίποτα σχεδόν να πει ούτε για τους μαγνήτες ούτε για το ήλεκτρο. Οι Κινέζοι όμως δεν αδιαφόρησαν για τον μαγνητισμό. Επιχείρησαν να τον εξηγήσουν αλλά και τον αξιοποίησαν. Βασιζόμενοι στην ιδιότητα του ραβδομαγνήτη να προσανατολίζεται έφτιαξαν μαγνητικές πυξίδες οι οποίες θα καθοδηγούσαν αργότερα τα κινέζικα πλοία στα μακρινά ταξίδια τους. Οι γνώσεις τους για το μαγνητισμό μαζί με το όργανο «πυξίδα» έφτασαν κάποτε και στην Ευρώπη.

Στον ευρωπαϊκό χώρο κατά το τέλος του μεσαίωνα είχε τεθεί επίμονα το ερώτημα «*που οφείλεται η επιμονή της πυξίδας να δείχνει το βορρά;*» και η απάντηση που κυριαρχούσε ήταν ότι «*η αιτία του γεγονότος βρίσκεται στον ουρανό*» και συγκεκριμένα στον Πολικό αστέρα. Η άποψη ότι ο Πολικός αστέρας –τ' αστέρι του βοριά– ασκούσε μαγνητική έλξη σε όλες τις πυξίδες είχε γίνει ένα είδος πεποίθησης.

Στη σύγχρονη όμως εποχή η μελέτη του μαγνητισμού αρχίζει με τη δημοσίευση του βιβλίου *De Magnete του* William Gilbert το οποίο, όπως είπαμε, αποτέλεσε ορόσημο και για την εξέλιξη των ιδεών πάνω στον ηλεκτρισμό. Το πρώτο πράγμα που προτείνει ο Gilbert είναι «*να ξαναδούμε και να αντιμετωπίσουμε με κριτικό μάτι οτιδήποτε έχει γραφτεί μέχρι τώρα για τον μαγνητισμό*».

Το πιο σημαντικό σημείο του βιβλίου είναι η άποψη που εκφράζει σχετικά με την αιτία προσανατολισμού της μαγνητικής βελόνας. Γι' αυτόν, η αιτία δεν βρίσκεται στους ουρανούς, αλλά είναι η ίδια η Γη, ολόκληρη η Γη αλλά και αποκλειστικά και μόνο η Γη, η οποία συμπεριφέρεται σαν ένας τεράστιος μαγνήτης. Ο ίδιος, για να ενισχύσει τον ισχυρισμό του πραγματοποίησε ένα σχεδόν μεγαλοφυές πείραμα. Χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο σφαιρικό μαγνήτη, τον ο-

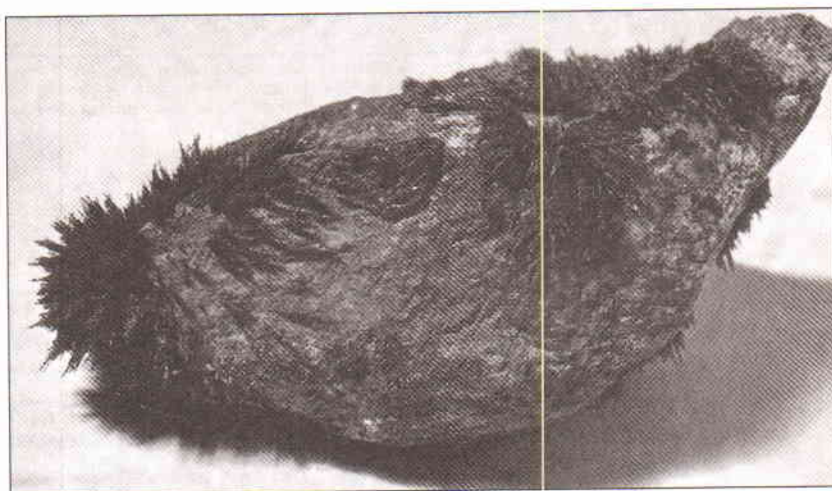


Μια terrela ανάλογη με αυτή που είχε κατασκευάσει ο Gilbert

ποίο ονόμασε terrela (στα λατινικά, μικρή Γη), έδειξε ότι κάθε μαγνητική βελόνα που θα βρεθεί κοντά του προσανατολίζεται με τον τρόπο που προσανατολίζονται οι βελόνες της πυξίδας γύρω από τη Γη. Η θεμελιώδης αυτή ανακάλυψη είναι ίσως και η μόνη σημαντική που έγινε στην ιστορία του μαγνητισμού όσο ακόμα ήταν μια επιστήμη ανεξάρτητη.

Οι ιδιότητες των μαγνητών

Στο εργαστήριο. Εννοείται ότι ο φυσικός μαγνήτης δεν προσφέρεται για έρευνα και πειραματισμό. Στο εργαστήριο χρησιμοποιούμε μαγνήτες τεχνητούς, αντικείμενα δηλαδή, μεγάλης ποικιλίας σχημάτων και μεγεθών, τα οποία έχουν αποκτήσει –ενώ δεν είχαν εξαρχής– μαγνητικές ικανότητες. Τεχνητός μαγνήτης, υπήρξε φυσικά, και η βελόνα της ναυτικής πυξίδας, όπως και η terrela, που χρησιμοποίησε ο Gilbert.



Χρησιμοποιώντας τεχνητούς μαγνήτες είναι εύκολο να οργανώσουμε τις παρατηρήσεις μας και να τις συνοψίσουμε:

i) *Οι μαγνήτες έλκουν ορισμένα μόνο υλικά.* Εκτός από τα σιδερένια και τα χαλύβδινα έλκουν επίσης αντικείμενα που περιέχουν νικέλιο, είτε κοβάλτο, είτε ορισμένα κράματα.

ii) *Οι μαγνήτες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.*

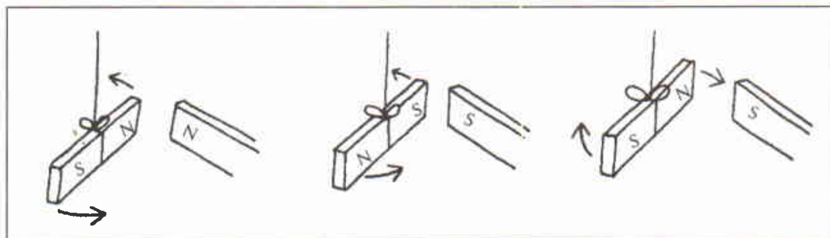
iii) *Οι μαγνήτες μπορούν και μαγνητίζουν ορισμένα αντικείμενα,* τα μετατρέπουν, δηλαδή, σε μαγνήτες. Η διαδικασία μετατροπής

λέγεται *μαγνήτιση*. Μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με επαφή είτε από απόσταση.

Θα χρειαστεί να τονίσουμε ότι τα τρία πρώτα φαινόμενα δεν αποτελούν τρία διαφορετικά και ανεξάρτητα φαινόμενα, αλλά συνιστούν τρεις πλευρές ενός ενιαίου φυσικού φαινομένου, που μπορούμε να το λέμε *μαγνητική αλληλεπίδραση*. Καθώς δηλαδή, ο μαγνήτης έλκει ένα σιδερένιο αντικείμενο, το αντικείμενο έχει ήδη μαγνητιστεί. Όσο για τη μαγνητική βελόνα, ο προσανατολισμός της δεν αποτελεί παρά εκδήλωση της μαγνητικής αλληλεπίδρασης ανάμεσα σ' αυτήν και στη Γη.

Θεωρίες. Προτού προχωρήσουμε και σε άλλα φαινόμενα μέσα από τα οποία εμφανίζονται οι ιδιότητες των μαγνητών, θα σταθούμε για λίγο σε δύο θεωρίες, οι οποίες εξυπηρέτησαν τους φυσικούς να περιγράψουν πιο εύκολα τη συμπεριφορά των μαγνητών. Είναι η θεωρία των δύο πόλων και η θεωρία για την ύπαρξη ποσοτήτων μαγνητισμού.

Η θεωρία των δύο πόλων. Τα δύο άκρα του ραβδομαγνήτη εμφανίζονται να παίζουν ένα ρόλο ιδιαίτερο, τόσο στην αλληλεπίδραση όσο και στον προσανατολισμό. Τα δύο αυτά άκρα ονομάζονται *πόλοι*.



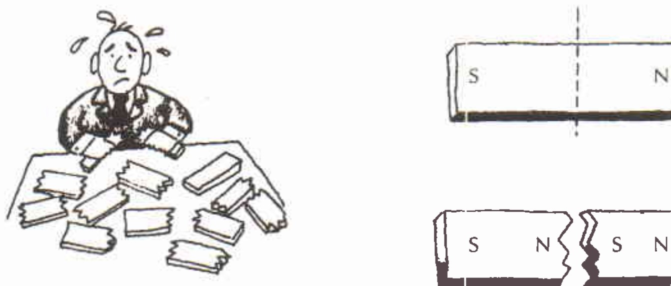
Η εκδήλωση τόσο έλξεων όσο και απώσεων οδήγησε στην ιδέα για δύο είδη πόλων κατά τρόπο ώστε η έλξη να αντιστοιχεί σε επίδραση πόλων ετερώνυμων και η άπωση σε αλληλεπίδραση πόλων ομώνυμων. Είδαμε ότι σε μια παρόμοια λογική βασίστηκε και η παραδοχή για τα δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου. Ο ένας από τους πόλους ονομάζεται βόρειος και ο άλλος νότιος. Οι ορισμοί βασίζονται στην ιδιότητα του προσανατολισμού. Όταν αφήσουμε να εκδηλωθεί ο προσανατολισμός του ραβδόμορφου μαγνήτη, το άκρο που «βλέπει» προς το βορρά ονομάζεται βόρειος, ενώ ο άλλος ονομάζεται νότιος. Ανεξάρτητα από το σχήμα του, κάθε μαγνήτης έχει δύο πόλους οπωσδήποτε ή έναν άρτιο αριθμό πόλων γενικότερα.

Η θεωρία για ποσότητες μαγνητισμού. Κατά τον 18ο αιώνα εμφανίστηκε και έγινε αποδεκτή μια έννοια εντελώς αντίστοιχη με το ηλεκτρικό φορτίο, η λεγόμενη ποσότητα μαγνητισμού, ένα είδος

«μαγνητικού φορτίου», εντοπισμένο σε κάθε πόλο μαγνήτη, το οποίο ήταν υπεύθυνο για τις αλληλεπιδράσεις των μαγνητών. Σε αναλογία με τα ηλεκτρικά φορτία θεωρήθηκε ότι υπάρχουν δύο είδη ποσοτήτων μαγνητισμού, η βόρεια (θετική) και η νότια (αρνητική), οι οποίες βρίσκονταν στους αντίστοιχους πόλους, τον βόρειο και τον νότιο, σε τρόπο ώστε, σε κάθε μαγνήτη με δύο πόλους, η βόρεια ποσότητα να είναι ίση με τη νότια.

Η έννοια *ποσότητα μαγνητισμού* εξυπηρέτησε εκφραστικά τη φυσική επιστήμη για δύο αιώνες περίπου. Στην εποχή μας, όμως, ενώ η έννοια *ηλεκτρικό φορτίο* κυριαρχεί, η έννοια *ποσότητα μαγνητισμού* έχει ουσιαστικά εγκαταλειφθεί. Ο κύριος λόγος είναι ότι σήμερα πια ο μαγνητισμός αντιμετωπίζεται με τις έννοιες ηλεκτρικό φορτίο και κίνηση.

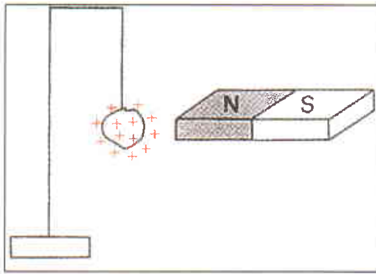
Είναι αδύνατο να απομονώσουμε τους δύο μαγνητικούς πόλους. Για πολλούς αιώνες ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός ακολούθησαν δρόμους διαφορετικούς και ανεξάρτητους. Από το 18ο αιώνα, όμως, ορισμένες ομοιότητες μεταξύ τους είχαν αρχίσει να φαίνονται. Τόσο ελκτικές όσο και απωστικές δυνάμεις εκδηλώνονται α) ανάμεσα σε μαγνήτες και β) ανάμεσα σε ηλεκτρισμένα σώματα. Δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου δεχόμαστε, το θετικό και το αρνητικό αλλά και δύο είδη μαγνητικών πόλων, τον βόρειο και τον νότιο και στην ίδια, μάλιστα, ακριβώς λογική, ότι τα ομώνυμα απωθούνται και τα ετερώνυμα έλκονται. Αν ξεκινήσουμε λοιπόν από το γεγονός ότι είναι δυνατόν να υπάρξει ένα μόνο είδος φορτίου –για παράδειγμα θετικό– απομονωμένο, λογικό είναι να αναρωτηθούμε μήπως κάτι ανάλογο, μπορεί να συμβεί και σε έναν πόλο μαγνητικό.
Μια απλή ιδέα είναι να κόψουμε το μαγνήτη σε δύο κομμάτια με την ελπίδα να έχουμε χωρίσει ένα βόρειο πόλο και ένα νότιο. Η εμπειρία, όμως, μας διαψεύδει. Στο σημείο που χωρίστηκε ο αρχικός



μαγνήτης «εμφανίζονται» δύο πόλοι ετερώνυμοι. Αν επιχειρήσουμε να κομματιάσουμε τους καινούργιους μαγνήτες που δημιουργήσαμε, θα φτάσουμε στο ίδιο αποτέλεσμα. Όσο και αν προσπαθήσου-

με θα αντιμετωπίζουμε την άρνηση της ύλης στο να δεχτεί την ύπαρξη ενός μαγνητικού πόλου, που θα είναι μόνος του. Η παρατήρηση μας δείχνει μια θεμελιώδη διαφορά ανάμεσα σε ηλεκτρικά φορτία και πόλους μαγνητικούς.

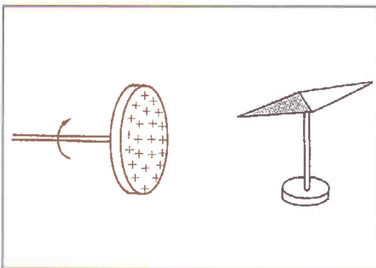
Μαγνήτες και ηλεκτρικά φορτία. Είναι ίσως λογικό να αναρωτηθούμε: *«οι μαγνήτες αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικά φορτία;»* Για να το διαπιστώσουμε χρειάζεται να επιστρέψουμε στο εργαστήριο.



α. Οι μαγνήτες δεν αλληλεπιδρούν με ακίνητα ηλεκτρικά φορτία. Μπορούμε να το αντιληφθούμε χρησιμοποιώντας ηλεκτροστατικό εκκρεμές. Πλησιάζουμε τον πόλο ενός μαγνήτη στο ηλεκτρισμένο σφαιρίδιο, το οποίο είναι από μονωτικό υλικό. Παρατηρούμε ότι ανεξάρτητα από το είδος και την ποσότητα του φορτίου που εμφανίζεται στο σφαιρίδιο, δεν συμβαίνει κανενός είδους αλληλεπίδραση.

β. Οι μαγνήτες αλληλεπιδρούν με κινούμενα φορτία. Το φαινόμενο το χαρακτηρίζουμε προκαταβολικά ως ιδιαίτερα σημαντικό. Προδίδει την ύπαρξη ενός δεσμού ανάμεσα στον Ηλεκτρισμό και τον Μαγνητισμό σε δύο δηλαδή πεδία μελέτης τα οποία για πολλούς αιώνες αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα χωρίς οι άνθρωποι να πιστεύουν ότι έχουν μεταξύ τους την παραμικρή συγγένεια.

Μια καλή ιδέα για να διαπιστώσουμε αυτή την αλληλεπίδραση είναι να κάνουμε ένα πείραμα παρόμοιο μ' αυτό, που για πρώτη φορά πραγματοποίησε ο Αμερικανός Rowland, στα 1876, σε μια εποχή όπου η διαδικασία για την ενοποίηση ηλεκτρισμού και μαγνητισμού προχωρούσε προς την ολοκλήρωσή της.



Χρειαζόμαστε έναν ηλεκτρισμένο δίσκο από μονωτικό υλικό, τον οποίο να μπορούμε να βάζουμε σε περιστροφή γύρω από έναν άξονα. Χρειαζόμαστε κι έναν ευαίσθητο ανιχνευτή μαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Μια μαγνητική βελόνα μπορεί να ανταποκριθεί σ' αυτό το ρόλο θαυμάσια. Ο ηλεκτρισμένος δίσκος βρίσκεται κοντά στη βελόνα. Όσο είναι ακίνητος, ανάμεσα σ' αυτόν και τη βελόνα δεν φαίνεται να εκδηλώνεται καμιά αλληλεπίδραση. Όταν, όμως, τον θέσουμε, σε περιστροφή, η συμπεριφορά της βελόνας φανερώνει την ύπαρξη αλληλεπίδρασης. *Ο μαγνήτης αλληλεπιδρά με το ηλεκτρικό φορτίο εφόσον –και μόνον εφόσον– βρίσκονται σε σχετική κίνηση.*

Η έννοια *πεδίο*

Πεδίο και δράση από απόσταση

Μια ιδέα παλιά. Ο Gilbert έλεγε κάποτε ότι κάθε μαγνήτης περιβάλλεται από μια σφαίρα επιρροής. Φανταζόταν, ότι ένα σιδερένιο αντικείμενο θα δεχόταν την επίδραση του μαγνήτη μόνο εφόσον «εισχωρούσε» μέσα σ' αυτή τη σφαίρα επιρροής. Σε σύγχρονη διατύπωση θα λέγαμε ότι κάθε μαγνήτης περιβάλλεται από ένα μαγνητικό πεδίο.

Ακαριαία δράση από απόσταση. Κατά τους δύο αιώνες που ακολούθησαν η ιδέα του πεδίου πέρασε στο περιθώριο. Στο μηχανιστικό πρότυπο του κόσμου, το οποίο προτάθηκε από τον Νεύτωνα και έγινε αποδεκτό από το σύνολο σχεδόν των Ευρωπαίων στοχαστών, τα φυσικά φαινόμενα περιγράφονται και ερμηνεύονται με τη βοήθεια των δυνάμεων που ασκούνται από απόσταση.

Στη νευτωνική δυναμική οι πάντοτε ελκτικές δυνάμεις βαρύτητας *δρουν ακαριαία και από απόσταση*. Η δράση λειτουργεί σ' ένα χώρο σταθερό και αναλλοίωτο ο οποίος παραμένει απαθής. Ο Coulomb περιγράφοντας τόσο τις ηλεκτρικές έλξεις όσο και τις ηλεκτρικές απώσεις κινήθηκε μέσα στα πλαίσια της νευτωνικής αντίληψης. Και γι' αυτόν η δράση από απόσταση λειτουργεί α) ακαριαία και β) αφήνοντας στον παρεμβαλλόμενο χώρο μονάχα ένα ρόλο θεατή. Με ανάλογο τρόπο αντιλαμβάνεται και τις αλληλεπιδράσεις μαγνητών.

Ο Faraday και η έννοια *πεδίο*. Κατά την τρίτη δεκαετία του 19ου αιώνα η ιδέα του πεδίου επανήλθε ανανεωμένη και δριμύτερη. Στο προσκήνιο την επανέφερε ο Michael Faraday (Μάικλ Φαραντέι, 1791-1867), ένας αυτοδίδακτος Άγγλος ερευνητής, ο οποίος έμελλε να εξελιχθεί στο μεγαλύτερο πειραματικό φυσικό όλων των εποχών.

Η ανανεωμένη έννοια *πεδίο* ξεκίνησε από την αλληλεπίδραση μαγνητών, αρχικά ως ένας εναλλακτικός τρόπος περιγραφής αυτών των αλληλεπιδράσεων. Ο Faraday ισχυριζόταν ότι κατά την επίδραση ενός μαγνήτη σ' έναν άλλο μαγνήτη, ο οποίος βρίσκεται σε απόσταση, η δράση προχωράει σταδιακά. Μ' άλλα λόγια μεταφέρεται στον χώρο που παρεμβάλλεται και απαιτεί χρόνο για τη μετάδοσή της. Η ιδέα αρνιόταν το ακαριαίο της «δράσης από απόσταση» και έδινε στον χώρο ένα ρόλο «πράκτορα». Γρήγορα επεκτάθηκε και στα άλλα γνωστά είδη αλληλεπιδράσεων.

Ο Faraday θεώρησε ότι ο χώρος ανάμεσα στα σώματα που αλληλεπιδρούν –βαρυτικά, ηλεκτρικά, μαγνητικά– ήταν ένα πεδίο δυνάμεων και το φαντάστηκε ότι *εξυπηρετεί στο να διαβιβάζεται η δράση από ένα σώμα στο άλλο.*

Η έννοια *πεδίο* σήμερα. Παρόλο που η λογική της δράσης από απόσταση δεν έχει απόλυτα εγκαταλειφθεί, η ιδέα του πεδίου σήμερα κυριαρχεί. Σύμφωνα με αυτήν, κατά την περιγραφή των αλληλεπιδράσεων, η έμφαση δίνεται στις ιδιότητες του χώρου. Η εμφάνιση ενός ηλεκτρικού φορτίου q για παράδειγμα, λέμε ότι προσδίδει στον χώρο μία ιδιότητα, την οποία δεν διέθετε προηγουμένως. Τον εξουσιοδοτεί να ασκεί δυνάμεις σε οποιοδήποτε άλλο φορτίο βρεθεί μέσα σ' αυτόν. Χωρίς το q ο χώρος δεν θα είχε αυτήν την ιδιότητα. Μπορούμε να πούμε ότι η *παρουσία του q αλλοιώνει το χώρο* ή ότι δημιουργεί ένα πεδίο δυνάμεων. Δίνεται επίσης έμφαση στο γεγονός ότι η αλλοίωση μεταδίδεται από σημείο σε σημείο με πεπερασμένη ταχύτητα.

Ορισμός, ύπαρξη και ανίχνευση ενός πεδίου δυνάμεων

Ορισμός. Λέμε ότι *σ' ένα χώρο υπάρχει πεδίο δυνάμεων εφόσον πάνω σ' ένα κατάλληλο υπόθεμα, το οποίο θα βρεθεί σε οποιοδήποτε σημείο του, ασκείται δύναμη.*

Ύπαρξη. Για τη φυσική η ύπαρξη ενός πεδίου δυνάμεων σχετίζεται οπωσδήποτε

α. *με μια πηγή* από την οποία εκπορεύεται και

β. *με μια ορισμένη διανυσματική ποσότητα* η οποία αντιστοιχίζεται σε κάθε σημείο του και το περιγράφει.

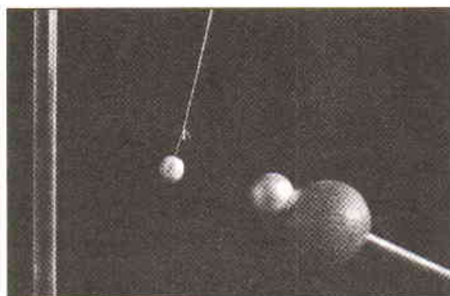
Η βαρυτική μάζα αποτελεί πηγή ενός πεδίου βαρύτητας. Το ηλεκτρικό φορτίο αποτελεί πηγή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Ως πηγή, τέλος, ενός μαγνητικού πεδίου μπορούμε να θεωρούμε προς το παρόν είτε ένα μαγνήτη είτε (σύμφωνα με το μήνυμα του πειράματος Rowland) τα ηλεκτρικά φορτία σε κίνηση. Αργότερα, θα μπορέσουμε να κατανοήσουμε αυτό που δεχόμαστε στην εποχή μας ότι σε κάθε μαγνήτη «κρύβονται» ηλεκτρικά φορτία σε κίνηση και συνεπώς πηγή κάθε μαγνητικού πεδίου είναι τα ηλεκτρικά φορτία, εφόσον αυτά βρίσκονται –ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς– σε κίνηση.

Το διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει το πεδίο βαρύτητας λέγεται ένταση του πεδίου βαρύτητας ($\vec{g}$). Για το ηλεκτρικό και το

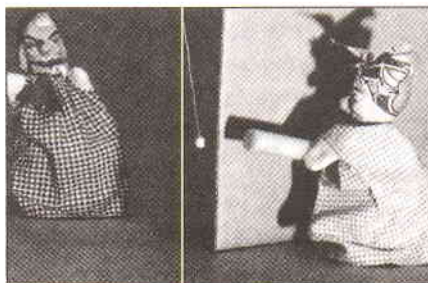
μαγνητικό πεδίο χρησιμοποιούνται η ένταση ηλεκτρικού πεδίου ($\vec{E}$) και η ένταση μαγνητικού πεδίου ($\vec{B}$), αντίστοιχα. Με τους ορισμούς και τη φυσική σημασία αυτών των μεγεθών θα ασχοληθούμε αμέσως μετά.

Ανίχνευση. Η ανίχνευση ενός πεδίου συνδέεται με ένα «κατάλληλο» *υπόθεμα*. Υπόθεμα για την ανίχνευση ενός πεδίου βαρύτητας είναι φυσικά, η βαρυτική μάζα ενός οποιουδήποτε σώματος. Για το ηλεκτρικό πεδίο ένα οποιοδήποτε φορτίο αρκεί για την ανίχνευση. Όσο για την ανίχνευση των μαγνητικών πεδίων, θα αρκεστούμε προς το παρόν στους μαγνήτες και κύρια στη μαγνητική βελόνα, για την οποία έχουμε επισημάνει ότι είναι ένας ιδιαίτερα ευαίσθητος ανιχνευτής των μαγνητικών αλληλεπιδράσεων.

Πεδίο	Πηγή	Περιγραφή	Ανίχνευση
Βαρυτικό	βαρυτική μάζα	Ένταση πεδίου βαρύτητας	βαρυτική μάζα
Ηλεκτρικό	ηλεκτρικό φορτίο	Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	ηλεκτρικό φορτίο
Μαγνητικό	μαγνήτης – ηλεκτρικό φορτίο σε κίνηση	Ένταση μαγνητικού πεδίου	– μαγνητική βελόνα – ηλεκτρικό φορτίο σε κίνηση



Όταν λειτουργεί η μηχανή Wimshurst, στο χώρο γύρω από τον ακροδέκτη εμφανίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Πηγή του πεδίου είναι τα φορτία του ακροδέκτη. Το σφαιρίδιο φέρει ηλεκτρικό φορτίο που παίζει το ρόλο ανιχνευτή.



Για τη μία από τις μαριονέττες η απόκλιση του εκκρεμούς οφείλεται σε κάποια ιδιότητα του χώρου.

Περιγραφή ενός πεδίου

Ένα πρόγραμμα. Η περιγραφή ενός ηλεκτρικού πεδίου θα πρέπει να αναφέρεται σε καθένα από τα σημεία του αλλοιωμένου χώρου και να μπορεί να δίνει απαντήσεις στα ερωτήματα του τύπου.
πόσο ισχυρό είναι ένα πεδίο στο σημείο αυτό;
κατά τη δράση του πεδίου σ' ένα φορτίο υπάρχει κάποια ορισμένη κατεύθυνση;
πόσο δύσκολο είναι να τοποθετήσουμε ένα φορτίο στο σημείο αυτό ή να αποσπάσουμε ένα φορτίο από το σημείο αυτό;

Για να απαντήσουν σε τέτοια ερωτήματα οι φυσικοί έχουν επινοήσει δύο μεγέθη. Το ένα είναι η *ένταση του ηλεκτρικού πεδίου*, ένα διανυσματικό μέγεθος, το οποίο αντιστοιχίζεται σε κάθε σημείο του πεδίου και βασίζεται στη νευτωνική έννοια *δύναμη*. Το άλλο μέγεθος είναι το *δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου*, ένα βαθμωτό μέγεθος το οποίο αντιστοιχίζεται σε κάθε σημείο του πεδίου και συνδέεται με την έννοια *ενέργεια*. Η ένταση προσφέρει απαντήσεις στα δύο πρώτα ερωτήματα και το δυναμικό δίνει απάντηση στο τρίτο ερώτημα.

Σε κάθε, λοιπόν, σημείο ενός πεδίου θα αντιστοιχίζουμε μια *ένταση* και ένα *δυναμικό*. Εκτός, όμως από τα δύο αυτά μεγέθη, η περιγραφή του πεδίου θα εξυπηρετηθεί μέσα από ορισμένες εικόνες, οι οποίες έχουν επινοηθεί για να αισθητοποιήσουν τον αόρατο πεδιακό χώρο και λέγονται *δυναμικές γραμμές*.

Το ηλεκτρικό (ηλεκτροστατικό) πεδίο

Το ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Ας μη μας διαφεύγει όμως και το τόσο σημαντικό μήνυμα που μας ήρθε από το πείραμα Rowland. Το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο δημιουργεί *και* μαγνητικό πεδίο. Για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε το όλο ζήτημα και να αποφύγουμε τη σύγχυση θα χρειαστεί προς το παρον να περιοριστούμε σε πεδία τα οποία έχουν ως πηγή **ηλεκτρικά φορτία ακίνητα ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς.** Τα ηλεκτρικά αυτά πεδία διατηρούνται στο χρόνο αμετάβλητα και χαρακτηρίζονται ως *πεδία ηλεκτροστατικά*. Στο κεφάλαιο αυτό με τον όρο ηλεκτρικά θα εννοούμε τα ηλεκτροστατικά.

Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Συγκεντρώνουμε την προσοχή μας σ' ένα ορισμένο σημείο του χώ-

ρου, το Μ. Φέρνουμε στο Μ το μικρό σφαιρίδιο του ηλεκτροστατικού εκκρεμούς. Ας υποθέσουμε ότι το σφαιρίδιο φέρει θετικό φορτίο q. Διαπιστώνουμε ότι στο φορτίο ασκείται δύναμη, κι αυτό σημαίνει ότι το Μ είναι σημείο ηλεκτρικού πεδίου. Τα σχετικά πειράματα μάς οδηγούν σε συμπεράσματα που αφορούν το σημείο Μ.

- Η δύναμη, την οποία ασκεί το πεδίο έχει μέτρο ανάλογο προς το δοκιμαστικό φορτίο που χρησιμοποιείται εκάστοτε. Μ' άλλα λόγια, το πηλίκο της δύναμης (F), που ασκείται σ' ένα δοκιμαστικό φορτίο, προς την ποσότητα (q) του φορτίου αυτού είναι σταθερό.'

- Η δύναμη του πεδίου πάνω σε κάποιο θετικό φορτίο έχει πάντοτε την ίδια κατεύθυνση.

Το σημείο Μ εμφανίζεται λοιπόν, να χαρακτηρίζεται

ι) από ένα ορισμένο *ποσοτικό στοιχείο,* όπως είναι το πηλίκο F/q και

ιι) από μια ορισμένη *κατεύθυνση,* την κοινή κατεύθυνση δράσης όλων των ηλεκτρικών δυνάμεων, που θα ασκηθούν εφόσον στο σημείο Μ βρεθεί οποιοδήποτε υπόθεμα –φορτίο θετικό.

Τόσο το πηλίκο, όσο και η χαρακτηριστική κατεύθυνση δεν εξαρτώνται από τις τιμές των θετικών φορτίων και των δυνάμεων, αλλά συνθέτουν κάποια ιδιότητα του σημείου Μ.

Συμφωνούμε, τέλος το σταθερό πηλίκο F/q να το ονομάζουμε *μέτρο της έντασης του πεδίου στο σημείο Μ,* τη δε κατεύθυνση να τη θεωρούμε *κατεύθυνση της έντασης του πεδίου στο σημείο Μ.*

Η σύνθεση μας οδηγεί στον ορισμό του διανυσματικού μεγέθους *ένταση του πεδίου* στο σημείο Μ. Εννοείται ότι, αν ασχοληθούμε με ένα άλλο σημείο Μ', θα φθάσουμε στο συμπέρασμα ότι κι αυτό χαρακτηρίζεται από μια ορισμένη ένταση, γενικά διαφορετική από εκείνη του σημείου Μ.

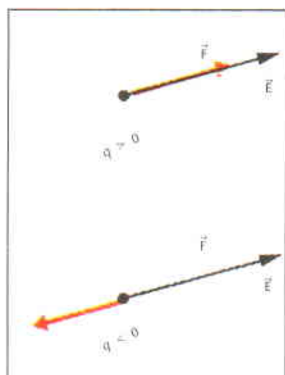
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (ή, απλά, ηλεκτρικό πεδίο $\vec{E}$) **σ' ένα σημείο του θα λέμε το πηλίκο της δύναμης ($\vec{F}$),που ασκείται σε φορτίο q (το οποίο βρίσκεται στο σημείο) προς το φορτίο.**
Χρησιμοποιώντας σύμβολα έχουμε,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \text{εξίσωση ορισμού της έντασης ηλεκτρικού πεδίου}$$

Μονάδα έντασης ηλεκτρικού πεδίου στο Διεθνές Σύστημα είναι το 1Newton ανά Coulomb (1N/C). Η μονάδα, όμως που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το ένα Volt ανά μέτρο (1V/m), η οποία, όπως θα δούμε, συμπίπτει με την προηγούμενη.

Αξίζει να προσέξουμε ότι:

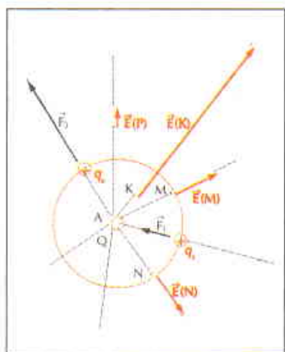
α. Η κατεύθυνση της έντασης είναι ανεξάρτητη από το πρόσημο του φορτίου –υποθέματος, το οποίο χρησιμοποιήσαμε.



β. Η κατεύθυνση της δύναμης συμπίπτει με την κατεύθυνση της έντασης αν το φορτίο –υπόθεμα είναι θετικό, ενώ είναι αντίθετη με την κατεύθυνση της έντασης αν το φορτίο– υπόθεμα είναι αρνητικό.

Η εξίσωση ορισμού της έντασης γράφεται και $\vec{F} = q\vec{E}$. Αυτός ο τρόπος γραφής επισημαίνει ότι η γνώση της $\vec{E}$ σε κάποιο σημείο μας επιτρέπει να προβλέπουμε τη δύναμη, που θα ασκηθεί σε κάποιο φορτίο (q), αν αυτό βρεθεί στο σημείο, στο οποίο αναφερόμαστε. Μπορούμε, μ' άλλα λόγια να υπολογίζουμε δυνάμεις χωρίς να ασχολούμαστε κάθε φορά με την πηγή του πεδίου, το οποίο τις ασκεί. Η δυνατότητα αυτή αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα της πεδιακής πρακτικής.

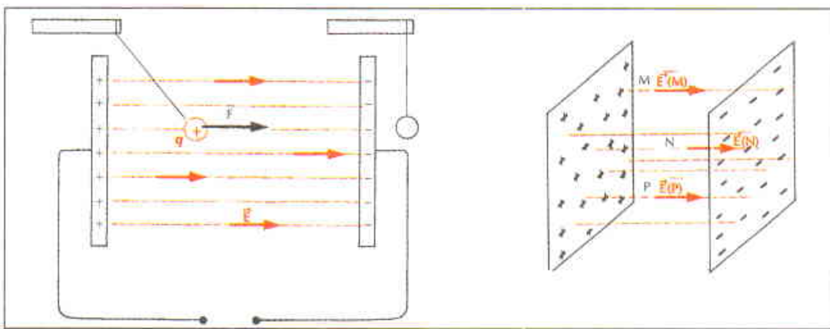
Το πεδίο ενός σημειακού φορτίου (πεδίο Coulomb). Η πιο απλή περίπτωση ηλεκτρικού πεδίου είναι αυτή στην οποία η πηγή του είναι ένα σημειακό φορτίο (Q) ακίνητο. Η ένταση στην περίπτωση αυτή μπορεί εύκολα να υπολογιστεί (για κάθε σημείο) αρκεί να συνδυάσουμε την εξισωση ορισμού της με το νόμο του Coulomb.



Το μέτρο της είναι:

$$E = k_{\eta\lambda} \frac{|Q|}{r^2}$$

Ένα πεδίο ομογενές. Αφήνουμε λίγο τη θεωρία για να ξαναγυρίσουμε στο πείραμα. Χρησιμοποιούμε δύο όμοιες μεταλλικές πλάκες, και τις φορτίζουμε με τους ακροδέκτες της μηχανής Wimshurst.



Η μία πλάκα αποκτά θετικό φορτίο και η άλλη αρνητικό, αλλά τα φορτία τους είναι απολύτως ίσα. Μ' ένα ηλεκτρικό εκκρεμές ανιχνεύουμε το πεδίο που δημιουργήθηκε. Όταν το σφαιρίδιο βρίσκεται στο χώρο μεταξύ των πλακών, το νήμα αποκλίνει από την κατακόρυφο, ενώ αν

βρεθεί έξω από αυτόν, το σφαιρίδιο παραμένει ακίνητο. Φέρνουμε το σφαιρίδιο σε διάφορα σημεία της περιοχής μεταξύ των πλακών και συγκρίνουμε τις εντάσεις των σημείων αυτών. Αν η απόσταση των πλακών είναι μικρή σε σχέση με τις διαστάσεις τους η σύγκριση δείχνει ότι

- η τιμή της έντασης *είναι ίδια για όλα τα σημεία της περιοχής.*
- *η διεύθυνσή της είναι κάθετη στα επίπεδα των δύο πλακών.*
- *η φορά της είναι πάντα από τη θετική πλάκα προς την αρνητική.*

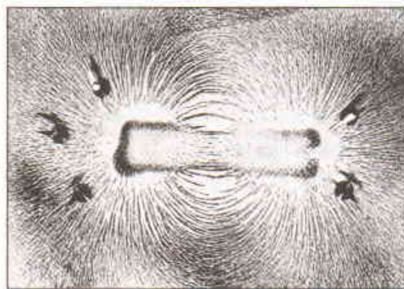
Μπορούμε να πούμε ότι στο πεδίο που δημιουργήθηκε η ένταση είναι χωρικά σταθερή. Κάθε πεδίο με χωρικά σταθερή ένταση λέγεται *ομογενές*. Ομογενές πεδίο μπορούμε να θεωρήσουμε και το γήινο πεδίο βαρύτητας σε περιοχή σημείων των οποίων οι αποστάσεις από το έδαφος είναι σε σχέση με τη γήινη ακτίνα, αρκετά μικρές.

Το σημειακό φορτίο ως υπόθεμα μέσα σε πεδίο ομογενές. Αν μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο βρεθεί ένα σημειακό φορτίο με μηδενική αρχική ταχύτητα, θα κινηθεί ευθύγραμμα και με σταθερή επιτάχυνση.
Εφόσον το φορτίο είναι θετικό η κατεύθυνση της κίνησης συμπίπτει με την κατεύθυνση της έντασης ενώ αν είναι αρνητικό είναι αντίθετη.

Τοπογραφία ενός πεδίου

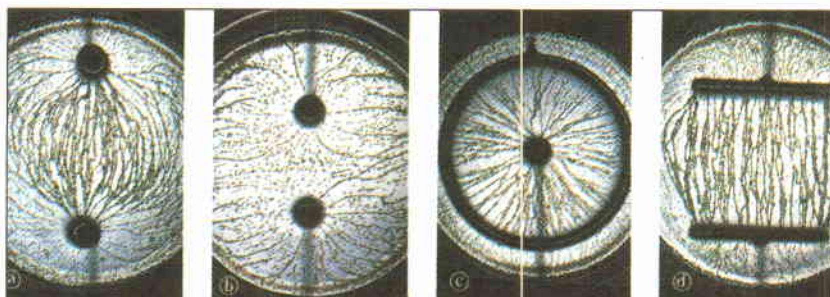
Δυναμικές γραμμές. Η περιγραφή του αόρατου πεδίου δεν περιορίστηκε στις δυνατότητες των διανυσμάτων. Η ανάγκη για εικόνα συνδυάστηκε με τη φαντασία του Michael Faraday και μας έδωσε μια παραπέρα δυνατότητα.

Όλοι μας έχουμε ανάγκη για εικόνα. Για να κατανοήσουμε το άτομο φτιάχνουμε εικόνες με πυρήνες σφαιρικούς, ζωγραφίζουμε και γραμμές με τις τροχιές των ηλεκτρονίων γύρω απ' αυτούς. Η εικόνα μάς βοηθάει να κατανοήσουμε το αόρατο. Αυτό που πρότεινε ο Faraday την τρίτη δεκαετία του 19ου αιώνα ήταν να εικονογραφήσουμε το αόρατο πεδίο με γραμμές. Η αφετηρία της ιδέας βρισκόταν σε μια εικόνα πραγματική. Αυτή που μας δίνουν τα σιδηρορινίσματα όταν τα ρίξουμε πάνω σ' ένα φύλλο χαρτί και έχουμε από κάτω ένα μαγνήτη. Τα ρινίσματα διατάσσονται και φτιάχνουν μια εικόνα με γραμμές τις οποίες ο Faraday ονόμασε *δυναμικές γραμμές*.



Κάτι ανάλογο μπορούμε να καταφέρουμε και στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου. Σε μια λεκάνη με μονωτικό υγρό, στο οποίο επιπλέουν ελαφροί σπόροι χλόης, τοποθετούμε κατάλληλα ένα φορτι-

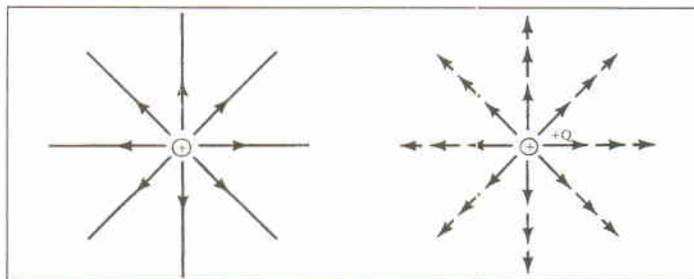
σμένο σώμα ή ένα σύστημα φορτισμένων σωμάτων. Δημιουργούμε, δηλαδή, προϋποθέσεις, για ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου.



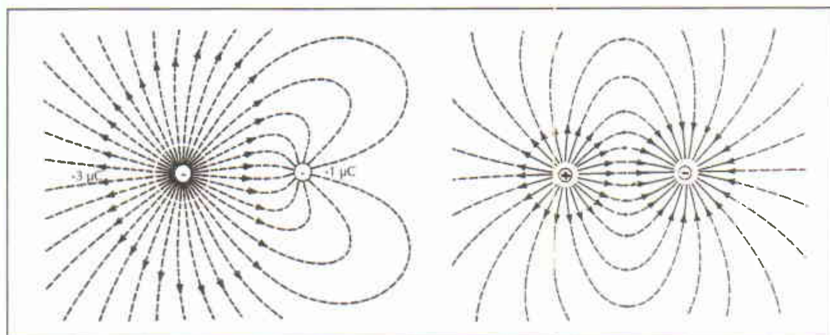
Βλέπουμε ότι οι σπόροι διευθετούνται και μας δίνουν μια εικόνα με ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, η οποία λέγεται ηλεκτρικό φάσμα. Δεν είναι δύσκολο να εκτιμήσουμε ότι στις περιοχές όπου το πεδίο είναι συγκριτικά ισχυρότερο εμφανίζεται και μεγαλύτερη πυκνότητα γραμμών. Η εκτίμησή μας ενισχύεται και από την εικόνα (d) που μας δίνει ένα πεδίο ομογενές στο οποίο οι δυναμικές γραμμές εμφανίζονται σ' όλες τις περιοχές του με την ίδια πυκνότητα.

Δυναμικές γραμμές και ένταση. Τα δύο προηγούμενα συμπεράσματα θα μας καθοδηγήσουν στο να συνδέσουμε την εικόνα των δυναμικών γραμμών με τη θεωρία, η οποία περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο χρησιμοποιώντας την έννοια *ένταση*. Για να κατανοήσουμε αυτή τη σύνδεση θα επιστρέψουμε στο ηλεκτρικό πεδίο Coulomb με πηγή θετικό φορτίο. Αν είχαμε την υπομονή να υπολογίσουμε την ένταση των διαφόρων σημείων και να σχεδιάσουμε ένα ένα, πάνω σ' ένα φύλλο χαρτί, τα αντίστοιχα διανύσματα, θα φτιάχναμε ένα σχέδιο, που θα θύμιζε την προηγούμενη εικόνα (c) των δυναμικών γραμμών.

Οι γραμμές που θα δημιουργηθούν από το σύνολο των διανυσμάτων $\vec{E}$ θα είναι ευθείες και θα έχουν κατεύθυνση από το θετικό φορτίο –πηγή προς το άπειρο. Καθώς θα απομακρυνόμαστε από το φορτίο– πηγή, οι γραμμές θα αραιώνουν και το μέτρο της έντασης θα ελαττώνεται.



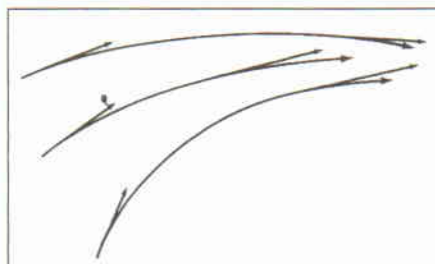
Αν επαναλάβουμε την προσπάθεια μ' ένα άλλο τυχαίο ηλεκτρικό πεδίο θα διαπιστώσουμε ότι δημιουργείται σχέδιο με γραμμές παρόμοιες προς εκείνες της εικόνας του πειράματος, αρκεί να δεχτούμε ότι σε κάθε σημείο τους το διάνυσμα $\vec{E}$ θα εφάπτεται σ' αυτές. Στο μεταξύ οι γραμμές αυτές θα έχουν κατεύθυνση πάντα από θετικά προς αρνητικά, η δε πυκνότητα τους «παρακολουθεί» τις τιμές της έντασης. Η σύνθεση όλων αυτών μας βοηθάει να συνοψίσουμε. Οι δυναμικές γραμμές είναι γραμμές με τις οποίες *αισθητοποιείται ένα πεδίο δυνάμεων.* Μας δίνουν πληροφορίες τόσο για την κατεύθυνση όσο και για το μέτρο της έντασης.



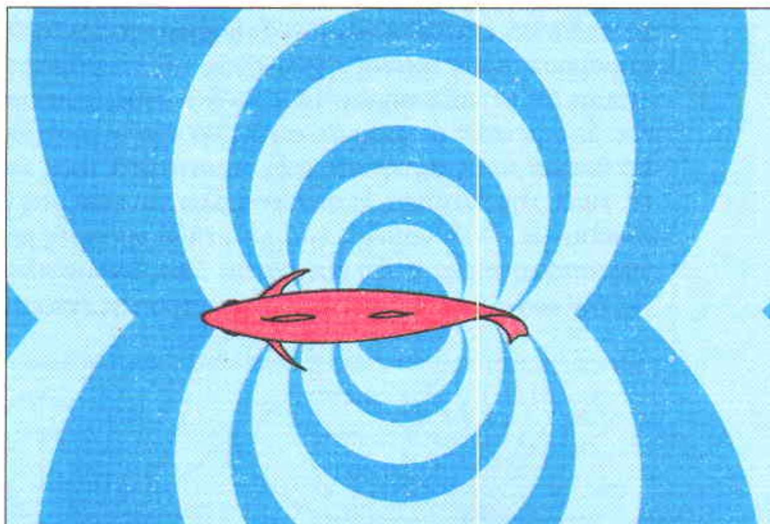
Οι πληροφορίες αυτές βασίζονται στις παρακάτω παραδοχές.

- **Το διάνυσμα $\vec{E}$(Μ) της έντασης εφάπτεται σε κάθε σημείο (Μ) οποιασδήποτε δυναμικής γραμμής.** Εννοείται ότι αν η γραμμή είναι ευθεία, ο φορέας του $\vec{E}$(Μ) συμπίπτει μ' αυτήν.
- **Η κατεύθυνση του $\vec{E}$ δίνει και την κατεύθυνση της δυναμικής γραμμής.**
- **Σε κάθε σημείο του πεδίου η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι ανάλογη προς το μέτρο της έντασης στο σημείο αυτό.**

Ας φανταστούμε μια πολύ μικρή επιφάνεια κάθετη στις γραμμές. Ως πυκνότητα των γραμμών θα θεωρούμε το πηλίκον του αριθμού των γραμμών, οι οποίες περνάνε από την επιφάνεια, προς το εμβαδόν της επιφάνειας. Μ' άλλα λόγια η πυκνότητα γραμμών εκφράζει τον αριθμό γραμμών που αντιστοιχεί στη μονάδα επιφάνειας.



- **Οι δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται. Από κάθε σημείο του πεδίου περνάει μία μόνο δυναμική γραμμή.**
- **Οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά.**



Ψάρια που «βλέπουν» με ηλεκτρικά πεδία

Ορισμένα ψάρια διαθέτουν ηλεκτρικά πεδία, με τα οποία ανιχνεύουν τα αντικείμενα του κόσμου τους και επικοινωνούν. Το πεδίο δημιουργείται από ηλεκτρικά φορτία που υπάρχουν στην ουρά και στο κεφάλι τους. Η παρουσία αγώγιμων αντικειμένων δημιουργεί στο πεδίο διαταραχές, οι οποίες γίνονται αντιληπτές από το σώμα του ψαριού με τη βοήθεια κατάλληλων αισθητηρίων. Μ' άλλα λόγια τα ψάρια αυτά ζώντας σε μεγάλα βάθη, όπου ουσιαστικά δεν υπάρχει φως, «βλέπουν» χρησιμοποιώντας τα ηλεκτρικά πεδία τους.

Δυναμικό

Είναι γνωστό πως όταν οι φυσικοί μιλούν για τις αλληλεπιδράσεις χρησιμοποιούν δύο γλώσσες διαφορετικές. Στη μία απ' αυτές κυριαρχεί η νευτωνική *δύναμη* ενώ στην άλλη ο κύριος ρόλος περνάει στη σχετικά νεότερη έννοια *δυναμική ενέργεια*.

Η μέχρι τώρα περιγραφή του ηλεκτρικού πεδίου βασίστηκε στο διανυσματικό μέγεθος *ένταση* το οποίο έχει ως αφετηρία την έννοια *δύναμη*. Στα παρακάτω η περιγραφή του πεδίου θα εμπλουτιστεί με ένα ακόμα μέγεθος, το οποίο περιγράφει το πεδίο στη γλώσσα της ενέργειας. Το μέγεθος λέγεται **δυναμικό του πεδίου σε κάποιο σημείο Μ** και σε αντίθεση με την ένταση είναι βαθμωτό. Μπορούμε προκαταβολικά να πούμε ότι εκφράζει την ανά μονάδα φορτίου δυναμική ενέργεια την οποία θα αποκτήσει ένα φορτίο αν βρεθεί στο συγκεκριμένο σημείο (Μ) του πεδίου αυτού.

Επιστρέφουμε σε ένα παλιό ερώτημα: *Πόσος κόπος απαιτείται να σηκώσουμε μια βαριά πέτρα και να τη φέρουμε σε κάποιο ύψος;* Στη γλώσσα της φυσικής το ερώτημα γίνεται:

Πόση ενέργεια πρέπει να μεταβιβάσουμε στην πέτρα για να ανυψωθεί;

Η απάντηση είναι γνωστή. Η ποσότητα μεταβιβαζόμενης ενέργειας μετριέται με το **έργο της δύναμης** που θα χρειαστεί να ασκήσουμε για να την ανυψώσουμε. Εξυπακούεται ότι όλα αυτά συμβαίνουν επειδή υπάρχει το πεδίο βαρύτητας.

Θεωρούμε τώρα ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο πηγάζει από ένα –ας υποθέσουμε– θετικά φορτισμένο αντικείμενο και εκτείνεται μέχρι το άπειρο. Το άπειρο ανήκει στη θεωρητική σκέψη και αντιστοιχεί στο «έξω από το πεδίο» της πειραματικής εμπειρίας. Συγκεντρώνουμε την προσοχή μας σε ένα σημείο Μ του πεδίου. Φανταζόμαστε ένα θετικό σημειακό φορτίο q να βρίσκεται «έξω» από το πεδίο αυτό.

Αναρωτιόμαστε: *Πόσος κόπος απαιτείται για να φέρουμε το φορτίο q στο σημείο Μ του πεδίου;*

Στη γλώσσα της φυσικής το ερώτημα γίνεται:

Πόση ενέργεια πρέπει να μεταβιβάσουμε στο φορτίο q για να έλθει στο σημείο Μ;

Χρειάζεται λοιπόν να υπολογίσουμε το έργο της δύναμης την οποία πρέπει να ασκούμε ώστε, εξουδετερώνοντας τη δύναμη του πεδίου στο φορτίο q, να το φέρουμε στο σημείο Μ. Είναι όμως αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η δύναμη την οποία ασκεί το πεδίο σε φορτίο q είναι ανάλογη προς την τιμή τού q ($F = Eq$). Αυτό σημαίνει ότι και το έργο της θα είναι ανάλογο προς την τιμή του q. Αν επιχειρήσουμε δηλαδή να κάνουμε το ίδιο με διπλάσιο φορτίο από την ίδια διαδρομή το έργο θα είναι διπλάσιο. Όπως όμως και στην περίπτωση του πεδίου βαρύτητας, το έργο θα είναι διπλάσιο ακόμα και αν η μετακίνηση (από το άπειρο στο σημείο Μ) γίνει από διαφορετική διαδρομή.

Εφόσον λοιπόν το έργο είναι ανάλογο του φορτίου το πηλίκο του έργου προς το φορτίο (έργο ανά μονάδα φορτίου) θα είναι μια ποσότητα ανεξάρτητη από το μετακινούμενο φορτίο αλλά και από το είδος της διαδρομής.

Η ποσότητα αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό στοιχείο του σημείου Μ και λέγεται *δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Μ.*

Είναι αξιοπρόσεκτο ότι το έργο της δύναμης την οποία πρέπει να ασκήσουμε για να μεταφέρουμε το θετικό φορτίο από το «άπειρο» στο σημείο Μ είναι ίσο με το έργο της δύναμης την οποία θα ασκούσε το πεδίο –στο φορτίο q– κατά τη μετακίνηση του q από το σημείο Μ στο άπειρο. Αυτό ακριβώς το έργο χρησιμοποιεί η φυσι-

κή για τον ορισμό της έννοιας *δυναμικό*. Αν, λοιπόν, συμβολίσουμε με V_M το δυναμικό στο σημείο Μ, με $W_{M\infty}$ το έργο της δύναμης την οποία ασκεί το πεδίο κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου q από το Μ στο άπειρο μπορούμε να γράφουμε:

$$V_M = \frac{W_{M\infty}}{q}$$

Στο διεθνές Σύστημα, μονάδα μετρήσεως της διαφοράς δυναμικού είναι το 1 Volt. Συμβολίζεται με 1 V και είναι εξ ορισμού ίσο με 1 J/C. Η ονομασία του προέρχεται από το όνομα του Alessandro Volta (Αλεσσάντρο Βόλτα, 1745-1827) του Ιταλού φυσικού, ο οποίος κατασκεύασε την πρώτη ηλεκτρική στήλη.

Χρειάζεται να σημειώσουμε ότι αν το –ως προς το άπειρο– δυναμικό ενός σημείου είναι αρνητικό, αυτό σημαίνει ότι για να μετακινηθεί κάποιο θετικό φορτίο από το άπειρο σ' αυτό το σημείο, δεν χρειάζεται να μεταβιβάσουμε ενέργεια. Το πεδίο μεταβιβάζει στο φορτίο ενέργεια. Το ανάλογο με τη βαρύτητα είναι ότι αν μια βαριά πέτρα αρχικά βρίσκεται ψηλά και την αφήσουμε να πέσει στο έδαφος, το πεδίο βαρύτητας τής μεταβιβάζει ενέργεια. Το δυναμικό του εδάφους είναι αρνητικό σε σχέση με εκείνο του σημείου που βρίσκεται ψηλότερα.

Η έννοια/μέγεθος *δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου*

Αναφέρεται: σε ένα ορισμένο σημείο Μ του ηλεκτρικού πεδίου.

Ορίζεται: ως το πηλίκο του έργου της δύναμης που ασκεί το πεδίο σε οποιοδήποτε φορτίο κατά την κίνηση του φορτίου από το σημείο Μ στο άπειρο, προς το φορτίο αυτό

Συμβολίζεται: με το γράμμα V οπότε:

$$V_M = \frac{W_{M\infty}}{q}$$

Είναι: έννοια/μέγεθος την οποία επινοήσαμε για να περιγράφουμε το πεδίο στη γλώσσα της ενέργειας.

Έχει ως μονάδα μετρήσεως: το 1 Volt (1V)

Διαφορά δυναμικού

Κάθε σημείο ενός ηλεκτρικού πεδίου θα έχει –στη γενική περίπτωση– ένα «δικό του» δυναμικό. Ας υποθέσουμε ότι δύο συγκεκριμένα σημεία, το Α και το Β, έχουν δυναμικά (ως προς το άπειρο) 14 V και

9 V. Η διαφορά των δύο δυναμικών, ίση με 5 V, θα αποτελεί και το ανά μονάδα φορτίου έργο της δύναμης του πεδίου κατά την οποιαδήποτε μετακίνηση ενός οποιουδήποτε φορτίου από το ένα σημείο (το Α) στο άλλο. Η ποσότητα αυτή αναφέρεται σε δύο –συγκεκριμένης διάταξης– σημεία Α και Β, λέγεται **διαφορά δυναμικού** και συμβολίζεται με V_{AB} και έχει βέβαια ως μονάδα μέτρησης το 1 Volt.

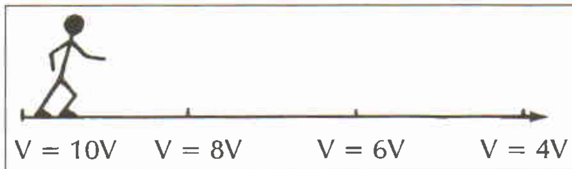
Διαφορά δυναμικού (ή τάση) μεταξύ δύο σημείων (Α και Β) ενός ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται το πηλίκο του έργου της δύναμης που ασκεί το πεδίο σε κάποιο φορτίο, κατά τη μετακίνηση του φορτίου από το ένα σημείο (Α) μέχρι το άλλο (Β) προς την ποσότητα φορτίου του υποθέματος.

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$$

Εφόσον τόσο το έργο W_{AB} όσο και το φορτίο (q) είναι θετικές ποσότητες λέμε ότι το πεδίο (ή η πηγή από την οποία εκπορεύεται) «μεταβιβάζει» στο φορτίο ενέργεια και το έργο μετρά αυτή ακριβώς την ενέργεια.

Κατά τη φορά του πεδίου τα δυναμικά ελαττώνονται. Ας φανταστούμε, για λόγους απλούστευσης, ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο και δύο σημεία Γ και Δ πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή, διατεταγμένα από Γ προς Δ κατά τη φορά τη δυναμικής γραμμής. Υποθέτουμε ότι «αφήνουμε» ένα θετικό σημειακό φορτίο στο σημείο Γ, οπότε αυτό θα επιταχυνθεί με κατεύθυνση προς το Δ. Η ασκούμενη στο φορτίο δύναμη έχει την κατεύθυνση της έντασης οπότε κατά τη μετακίνηση από Γ προς Δ, το έργο θα είναι θετικό.

$$V_\Gamma - V_\Delta = \frac{W_{\Gamma\Delta}}{q}$$ και εφόσον $W_{\Gamma\Delta}>0$ και $q>0$ θα είναι $\mathbf{V_\Gamma>V_\Delta}$.



Το συμπέρασμα είναι γενικό και παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον:

- *Κατά τη φορά της δυναμικής γραμμής τα δυναμικά ελαττώνονται.*
- *Κάθε θετικό φορτίο που αφήνεται σε ηλεκτρικό πεδίο μετακινείται προς μικρότερα δυναμικά.*

Δυναμικό και δυναμική ενέργεια

Καθώς μια πέτρα πέφτει ελεύθερα από κάποιο σημείο Μ προς το έδαφος, το θετικό έργο της δύναμης *βάρος* μας δίνει και την τιμή της βαρυτικής δυναμικής ενέργειας την οποία είχε η πέτρα (ως

προς το έδαφος) όταν βρισκόταν στο σημείο Μ.

Αντίστοιχα το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου q από το σημείο Μ στο άπειρο μας δίνει και την (ως προς το άπειρο) δυναμική ενέργεια την οποία είχε το σημειακό φορτίο όταν βρισκόταν στο σημείο Μ του ηλεκτρικού πεδίου. Μπορούμε, λοιπόν να γράφουμε:

$$V_M = \frac{W_{M\infty}}{q} \text{ ή } V_M = \frac{U}{q} \text{ οπότε } \mathbf{U = V_M q}$$

Η ως προς άπειρο δυναμική ενέργεια την οποία «έχει» ένα φορτισμένο σημειακό αντικείμενο όταν βρίσκεται σε σημείο Μ ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με το γινόμενο του δυναμικού του σημείου επί το φορτίο του αντικειμένου.

Αξίζει να προσέξουμε ότι η δυναμική ενέργεια αναφέρεται στο φορτισμένο αντικείμενο ενώ το δυναμικό αναφέρεται σε σημείο του πεδίου.

Μπορούμε να πούμε ότι αν ένα φορτισμένο σημειακό αντικείμενο βρεθεί σε κάποιο σημείο Μ ενός ηλεκτρικού πεδίου

α) Η *ένταση του ηλεκτρικού πεδίου* στο σημείο Μ είναι ο συντελεστής με τον οποίο θα χρειαστεί να πολλαπλασιάσουμε το φορτίο του αντικειμένου για να προκύψει η δύναμη η οποία θα ασκηθεί σ' αυτό.

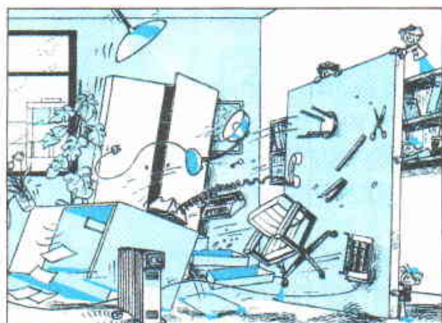
$$\mathbf{F = E_M q}$$

β) Το *δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου* στο σημείο Μ είναι ο συντελεστής με τον οποίο θα χρειαστεί να πολλαπλασιάσουμε το φορτίο του αντικειμένου για να προκύψει η δυναμική του ενέργεια.

$$\mathbf{U = V_M q}$$

Μαγνητικό πεδίο

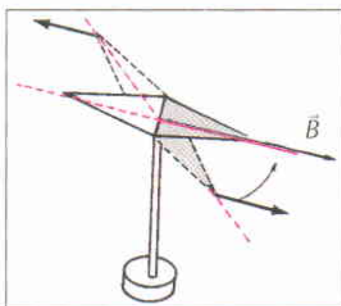
Το διάνυσμα «μαγνητικό πεδίο $\vec{B}$». Η παρουσία ενός μαγνήτη αλλοιώνει το χώρο. Λέμε ότι κάθε μαγνήτης δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Η αντίστοιχη προς την ένταση $\vec{E}$ διανυσματική ποσότητα, η οποία αποδίδεται σε κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου και το περιγράφει λέγεται *ένταση μαγνητικού πεδίου* $\vec{B}$. Όπως και η ένταση ηλεκτρικού πεδίου εκφράζει και αυτή την πεδιακή δύναμη ανά μονάδα υποθέματος.



Τι είναι, όμως, για το μαγνητικό πεδίο, υπόθεμα; Έχουμε ήδη αναφέρει ότι ο 20ος αιώνας τόσο ως πηγή όσο και ως υπόθεμα μαγνητικού πεδίου θεωρεί τα κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Προς το παρόν, θα αρκεστούμε στην παραδοχή μαγνητικών πόλων και των αντίστοιχων ποσοτήτων μαγνητισμού (m), στις οποίες θα θεωρούμε ότι ασκείται η δύναμη του μαγνητικού πεδίου. Ένας προσωρινός ορισμός για την ένταση του πεδίου θα δοθεί, από την εξίσωση $\vec{B} = \vec{F}/m$, σύμφωνα με την οποία η ασκούμενη σε βόρειο πόλο (m>0) δύναμη θα έχει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου ενώ η ασκούμενη σε νότιο πόλο (m<0) δύναμη θα έχει, σε σχέση με το διάνυσμα $\vec{B}$ αντίθετη κατεύθυνση.

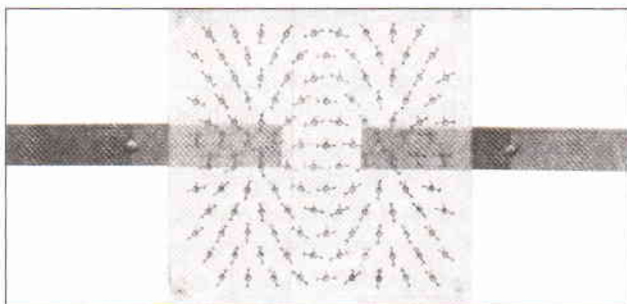
Η αντιμετώπιση αυτή μας βοηθάει να δώσουμε μια ερμηνεία στη συμπεριφορά της μαγνητικής βελόνας, η οποία, όπως ξέρουμε, αποτελεί για το μαγνητικό πεδίο έναν ανιχνευτή ιδιαίτερα ευαίσθητο.

Θεωρούμε ότι σε κάθε μαγνητική βελόνα υπάρχει ένα σύστημα δύο αντίθετων πόλων.

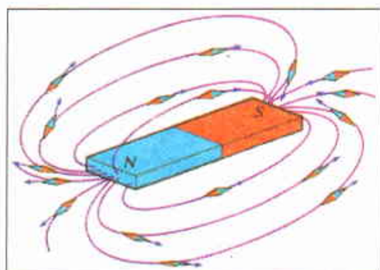


Όταν η βελόνα βρεθεί σε μαγνητικό πεδίο (το οποίο στην περιοχή της μπορεί να θεωρηθεί ομογενές) σε κάθε πόλο της θα ασκηθεί μία δύναμη. Οι δύο δυνάμεις είναι παράλληλες με ίσα μέτρα και κατευθύνσεις αντίθετες και η επίδρασή τους τείνει να προσανατολίσει τη βελόνα κατά τη θέση της ευσταθούς ισορροπίας της. Και αυτή είναι η θέση στην οποία η κατεύθυνση από το νότιο πόλο προς το βόρειο συμπίπτει με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$. Η βελόνα συνεπώς όχι μόνο ανιχνεύει το μαγνητικό πεδίο αλλά και *όταν ισορροπεί μέσα σ' αυτό αποτελεί κατά κάποιο τρόπο μια «φωτογραφία» της κατεύθυνσης του $\vec{B}$ της περιοχής.*

Τοπογραφία του μαγνητικού πεδίου. Δυναμικές γραμμές. Πάνω σ' ένα τζάμι τοποθετημένο οριζόντια βάζουμε πολλές και μικρές μαγνητικές βελόνες.



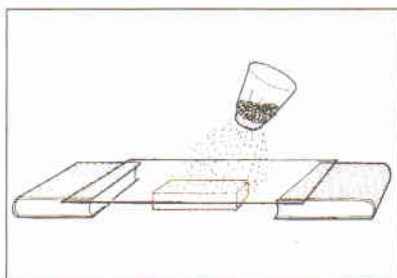
Με τους αντίθετους πόλους δυο μαγνητών δημιουργούμε ένα μαγνητικό πεδίο μέσα στο οποίο οι βελόνες προσανατολίζονται. Η φωτογραφία που παραθέτουμε είναι εύγλωττη. Μας εμφανίζει ένα σύνολο από γραμμές. Ας μην

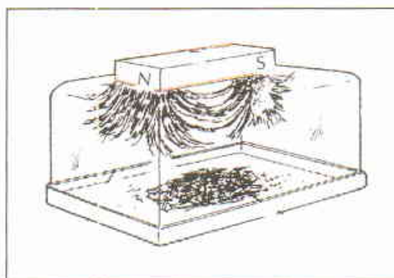


ξεχνάμε ότι κάθε βελόνα δείχνει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$ της περιοχής της.

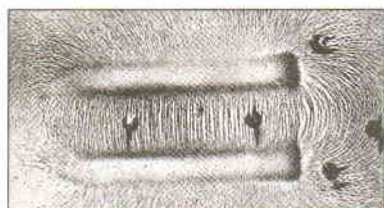
Αν αντί για μικρές μαγνητικές βελόνες χρησιμοποιήσουμε σιδηρορινίσματα η εικόνα που θα πάρουμε είναι ακριβώς εκείνη που, όπως έχουμε πει, ώθησε τον Faraday να προτείνει την εικονογράφηση του αόρατου πεδίου με δυναμικές γραμμές.

Αυτό που συνέβη με τα ρινίσματα είναι ότι όταν βρέθηκαν στο μαγνητικό πεδίο μαγνητίστηκαν και προσανατολίστηκαν με τρόπο παρόμοιο με τις μαγνητικές βελόνες του προηγούμενου πειράματος.





Παρατηρώντας την εικόνα με τα ρινίσματα (μαγνητικό φάσμα) και γνωρίζοντας προκαταβολικά σε ποιες περιοχές το πεδίο είναι ισχυρότερο, θα μπορέσουμε να φτάσουμε στο συμπέρασμα ότι στις περιοχές αυτές εμφανίζεται μεγαλύτερη πυκνότητα μαγνητικών δυναμικών γραμμών.



Μαγνητικό φάσμα πεταλοειδούς μαγνήτη. Σε ορισμένη περιοχή οι δυναμικές γραμμές είναι παράλληλες και έχουν την ίδια πυκνότητα

Όλα τα παραπάνω μπορούν να δικαιολογήσουν τη θεωρητική προσέγγιση για τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές.

- **Το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$ εφάπτεται σε κάθε σημείο οποιασδήποτε δυναμικής γραμμής.**
- **Η κατεύθυνση του $\vec{B}$ δίνει την κατεύθυνση της γραμμής.**
- **Οι δυναμικές γραμμές σχεδιάζονται έτσι ώστε η πυκνότητά τους να είναι ανάλογη προς το μέτρο (B) του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$.**

Όπως συμβαίνει και με τις ηλεκτρικές γραμμές οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές δεν τέμνονται. Σε αντίθεση, όμως, με τις ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές, οι οποίες είναι ανοιχτές, οι μαγνητικές γραμμές είναι «κλειστές». Βγαίνουν από το βόρειο πόλο του μαγνήτη – πηγή και κατευθύνονται προς το νότιο πόλο στον οποίο εισέρχονται.

Στο Διεθνές σύστημα, η μονάδα μέτρησης του μεγέθους **μαγνητικό πεδίο $\vec{B}$** λέγεται Tesla (Τέσλα) και συμβολίζεται με 1Τ.

Ηλεκτρισμός και δομή της ύλης

Σε όλη τη διάρκεια του δέκατου ένατου αιώνα τόσο η έρευνα για τη **δομή της ύλης** όσο και η έρευνα για τη **φύση του ηλεκτρισμού** δεν είχαν καταφέρει να δώσουν συγκροτημένες θεωρίες, ικανές να ερμηνεύσουν όλα τα συναφή πειραματικά μηνύματα.

Η θεωρία ότι η ύλη αποτελείται από άτομα κατακτούσε συνεχώς έδαφος, χωρίς όμως να μπορεί να δώσει μια απάντηση στο ερώτημα: *'Υπάρχει άραγε κάποια εσωτερική δομή για κάθε άτομο;* Το άτομο του 19ου αιώνα ήταν μία θεμελιακή ποσότητα ύλης σε αδιάκοπη κίνηση, αντιμετωπίζονταν όμως κυριολεκτικά ως άτομο, δηλαδή ως μία ολότητα αδιάσπαστη.

Αναπάντητα ερωτήματα υπήρχαν και για τη φύση του ηλεκτρικού φορτίου. Η αντίληψη, η οποία εξακολουθούσε να κυριαρχεί, αντιμετώπιζε τον ηλεκτρισμό ως ένα συνεχές ρευστό.

Κατά τις αρχές του εικοστού αιώνα η συσσώρευση πειραματικών δεδομένων θα σπρώξει τους θεωρητικούς φυσικούς προς δύο ισχυρισμούς. Σύμφωνα με τον πρώτο, **τα άτομα έχουν οπωσδήποτε κάποια εσωτερική δομή** και μάλιστα πολύπλοκη. Σύμφωνα με τον δεύτερο, **η πηγή του ηλεκτρικού φορτίου θα πρέπει να αναζητηθεί σ' αυτήν ακριβώς τη δομή.**

Το φορτίο είναι κβαντισμένο. Στο μεταξύ, αποφασιστικά πειράματα –για τα οποία θα μιλήσουμε πιο κάτω– έθεσαν εκτός μάχης την άποψη ότι ο ηλεκτρισμός είναι συνεχές ρευστό και ενίσχυσαν μία υποψία εντελώς διαφορετικής λογικής, η οποία είχε εκφραστεί και παλιότερα. Σύμφωνα μ' αυτήν, **το ηλεκτρικό φορτίο υπάρχει μόνο σε ασυνεχείς ποσότητες.** Σήμερα, για να περιγράψουμε αυτό το γεγονός, χρησιμοποιούμε τη διατύπωση **το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο** την οποία θα προσπαθήσουμε να διασαφηνίσουμε.

Το ηλεκτρικό φορτίο είναι ένα μέγεθος που δεν μπορεί να παίρνει όλες τις πραγματικές τιμές. Υπάρχει πρώτα απ' όλα ένα ελάχιστο στις ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου. Είναι το λεγόμενο στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο έχει επικρατήσει να συμβολίζεται με το γράμμα e. Η φύση φαίνεται να «απαγορεύει» την ύπαρξη φορτίου που να είναι μικρότερο από αυτό. Το στοιχειώδες φορτίο μετρήθηκε και βρέθηκε ίσο με $e = 1{,}602\ 10^{-19} C$.

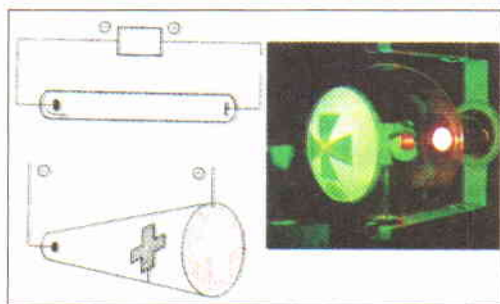
Η οποιαδήποτε, λοιπόν, ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου (q) είναι α-

κέραιο πολλαπλάσιο του στοιχειώδους φορτίου e (q=ne). Μια ποσότητα φορτίου μπορεί να είναι 80e, 81e, 82e, δεν μπορεί όμως να είναι 80,4e. Με το φορτίο συμβαίνει κατά κάποιο τρόπο ό,τι και με το νόμισμα μιας χώρας, το οποίο δεν μπορεί να παίρνει όλες τις τιμές.

Το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο υπάρχει σε δύο τύπους. Υπάρχει ως θετικό (+e) και ως αρνητικό (-e).

Ηλεκτρόνιο. Σε κάθε σχολικό εργαστήριο υπάρχει ένας σωλήνας καθοδικών ακτίνων. Τον λέμε και σωλήνα Crookes. Αν τον βάλουμε να λειτουργήσει θα κατανοήσουμε καλύτερα όσα παρακάτω θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε.

Στα 1879 ένας σημαντικός Άγγλος επιστήμονας της εποχής, ο William Crookes (Γουίλιαμ Κρουκς) μελετούσε την ηλεκτρική αγωγιμότητα που εμφανίζεται μέσα σ' ένα κλειστό σωλήνα υψηλού κενού. Στα άκρα του σωλήνα υπήρχαν δύο μεταλλικοί αγωγοί-ηλεκτρόδια, στους οποίους εφάρμοζε διαφορά δυναμικού μερικών χιλιάδων βολτ.



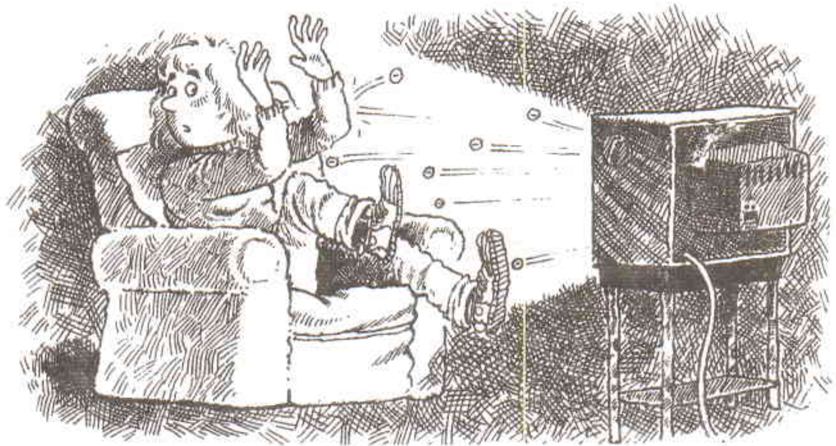
Κατά τη διάρκεια της αγωγιμότητας ένα παράξενο φθορίζον φως στο απέναντι από το αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) τοίχωμα πρόδιδε την παρουσία –μέσα στο σωλήνα– μιας δέσμης αόρατης. Η δέσμη έδειχνε να έχει κατεύθυνση από το ηλεκτρόδιο – κάθοδος προς το απέναντι τοίχωμα και ευθύγραμμη διάδοση, όπως το φως, σε σημείο που με την παρεμβολή αδιαφανούς γι' αυτήν αντικειμένου, να δημιουργείται στο απέναντι τοίχωμα σκιά. Το όνομα που δόθηκε στη δέσμη ήταν *καθοδικές ακτίνες*. Η φύση της παρέμενε ένα αίνιγμα.

Ήταν άραγε μια δέσμη από σωματίδια; Μήπως ήταν κάποια ακτινοβολία ανάλογη με το φως ή κάτι άλλο εντελώς διαφορετικό;

Οι περισσότεροι Άγγλοι επιστήμονες, σε αντίθεση με τους άλλους Ευρωπαίους, υποστήριξαν ότι η δέσμη αποτελείται από σωματίδια. Τα μηνύματα της έρευνας έδειχναν ότι οι Άγγλοι είχαν δίκιο. Μάλιστα, η απόκλιση, η οποία ήταν δυνατόν να επιβληθεί πάνω στη δέσμη εξαιτίας της παρουσίας μαγνητικού πεδίου, ενθάρρυνε την αγγλική εκδοχή, αλλά και έδειχνε ότι τα σωματίδια αυτά πρέπει να είναι σωματίδια με ηλεκτρικό φορτίο. (Ας μην ξεχνάμε ότι το μαγνητικό πεδίο επιδρά στα κινούμενα φορτία). Η κατεύθυνση της δέσμης σε συνδυασμό και με τη φορά κατά την οποία απέκλινε, ήταν σοβαρά επιχειρήματα υπέρ

της άποψης ότι τα σωματίδια αυτά είχαν φορτίο αρνητικό.

Δεκαοχτώ χρόνια αργότερα ένας άλλος Άγγλος φυσικός, ο J.J Thomson έδειξε ότι τα σωματίδια της δέσμης δεν είχαν μόνο φορτίο αλλά και μάζα (m). Μετρώντας, μάλιστα, για κάθε σωματίδιο της δέσμης, το πηλίκο του φορτίου προς τη μάζα του (q/m) πέτυχε να αποκαλύψει κάτι πολύ πιο σημαντικό. Ότι το πηλίκο αυτό παρέμενε το ίδιο, ανεξάρτητα από τη φύση των μεταλλικών ηλεκτροδίων, ανεξάρτητα από το είδος του αερίου στο σωλήνα, ανεξάρτητα από οτιδήποτε. Για το κάθε σωματίδιο της δέσμης πρότεινε ένα όνομα, που επρόκειτο να παίξει έναν ρόλο πρωταγωνιστή στην επιστημονική εξέλιξη του αιώνα που ακολούθησε. Πρότεινε το όνομα **ηλεκτρόνιο** (electron).



Οι καθοδικές ακτίνες έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ανακάλυψη του ηλεκτρονίου. Βέβαια, στα 1879, έπρεπε να διαθέτει κάποιος επιστημονική φαντασία για να προβλέψει ότι τέτοιες ηλεκτρονικές δέσμες στο μέλλον θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται σε τρομακτικά μαζική κλίμακα για να βομβαρδίζουν μια φθορίζουσα οθόνη και να δημιουργούν τις εικόνες της τηλεόρασης

Στην εξέλιξη των πραγμάτων αποδείχθηκε ότι το αρνητικό φορτίο του ηλεκτρονίου ήταν το στοιχειώδες φορτίο για το οποίο μιλήσαμε. Έντεκα χρόνια αργότερα (1908) ο Αμερικανός R. A. Millikan, μ' ένα εμπνευσμένο πείραμα, κατάφερε να μετρήσει το φορτίο του ηλεκτρονίου με μεγάλη ακρίβεια.

Το ηλεκτρικό φορτίο στη δομή του ατόμου. Από πού, όμως, προέρχονταν τα ηλεκτρόνια;

Η απάντηση δόθηκε από τον ίδιο τον J.J. Thomson. Τα ηλεκτρόνια εκπέμπονταν από το μέταλλο της καθόδου, αποτελούσαν δηλαδή συστατικό της ύλης του μετάλλου, είτε αυτό ήταν από χαλκό, είτε από σίδηρο, είτε από οποιοδήποτε άλλο μέταλλο. Τολμώντας

μια παραπέρα γενίκευση ισχυρίστηκε ότι **το ηλεκτρόνιο είναι συστατικό όλων των ατόμων της ύλης.**



Στο μοντέλο του ατόμου που πρότεινε ο ίδιος, αλλά και στα πιο «πειστικά» μοντέλα, που προτάθηκαν τη δεύτερη δεκαετία του αιώνα μας, τα ηλεκτρόνια υπάρχουν με το αρνητικό φορτίο τους και αποτελούν το μοναδικό φορέα αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου μέσα σε κάθε άτομο. Όλα τα ηλεκτρόνια του κόσμου είναι ίδια, με την έννοια ότι έχουν ίσα αρνητικά φορτία και ίσες μάζες (ηρεμίας).

Ένα ακόμη σωματίδιο, συστατικό του ατόμου κι αυτό, είναι **ο μοναδικός φορέας θετικού φορτίου.** Είναι το **πρωτόνιο** (p) που φέρει το στοιχειώδες θετικό φορτίο (+e). Βλέπουμε, δηλαδή, ότι το ηλεκτρικό φορτίο δεν βρίσκεται μόνο του, βρίσκεται πάντα στα υπό-ατομικά σωματίδια, το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο. Αξίζει να τονίσουμε ότι, παρόλο που οι ποσότητες φορτίου των δύο σωματιδίων είναι απολύτως ίσες, η μάζα του πρωτονίου είναι εντυπωσιακά μεγαλύτερη –2000 περίπου φορές– από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Στα 1932 η δομή του ατόμου συμπληρώθηκε από ένα ακόμα σωματίδιο με μάζα λίγο μεγαλύτερη και από τη μάζα του πρωτονίου. Το τρίτο αυτό σωματίδιο δεχόμαστε ότι δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο. Σ' αυτό ακριβώς το γεγονός βασίζεται και η ονομασία του. Είναι το νετρόνιο (n) neutron, δηλαδή ουδετερόνιο.

Η διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου. Αν φέρουμε σε στενή επαφή δύο αντικείμενα, ορισμένα ηλεκτρόνια θα μεταβιβαστούν από το ένα στο άλλο. Κάτι τέτοιο συμβαίνει, όταν τρίβουμε την επιφάνεια του στυλό πάνω στο μάλλινο πουλόβερ μας και το ηλεκτρίζουμε.

Πρέπει εδώ να πούμε ότι αυτό που πετυχαίνουμε με το τρίψιμο είναι μια πολύ στενή επαφή των επιφανειών των δύο αντικειμένων. Είναι δυνατόν να μεταβιβαστούν μετρήσιμες ποσότητες αρνη-

τικού φορτίου με το να πιέσουμε μεταξύ τους δύο διαφορετικά υλικά. Δεν είναι, επομένως, ακριβές να λέμε ότι τα ηλεκτρικά φορτία «παράγονται» ή «γίνονται». Πιο σωστό είναι να λέμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο «εμφανίζεται». Αυτό που συμβαίνει είναι μια *ανακατανομή των δύο ειδών φορτίου,* που υπάρχουν στα διάφορα σώματα, τέτοια ώστε το ολικό φορτίο να διατηρείται σταθερό.

Η υπόθεση της διατήρησης του φορτίου επιβεβαιώθηκε τόσο σε μακροσκοπικά πειράματα όσο και σε ατομικό και πυρηνικό επίπεδο, χωρίς να έχει μέχρι σήμερα, παρουσιαστεί κάποια εξαίρεση. Ως ολικό φορτίο θεωρούμε το αλγεβρικό άθροισμα των φορτίων του συστήματος. Αναφερόμενοι σε απομονωμένο σύστημα, σε σύστημα δηλαδή το οποίο δεν ανταλλάσσει ύλη με το περιβάλλον του, μπορούμε να πούμε ότι:

Οποιεσδήποτε μεταβολές και να συμβαίνουν σε ένα απομονωμένο σύστημα το ολικό φορτίο του παραμένει, σε κάθε χρονική στιγμή, σταθερό.

Η πρόταση αυτή αποτελεί την **αρχή της διατήρησης του φορτίου.** Ένας άλλος τρόπος να διατυπώσουμε τη διατήρηση του φορτίου είναι να πούμε ότι *το φορτίο δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται.*



Αν τρίψουμε τη γάτα με μια βούρτσα, η γάτα θα είναι θετικά φορτισμένη και η βούρτσα αρνητικά. Εξυπακούεται ότι το ηλεκτρικό φορτίο δεν δημιουργήθηκε. Με το τρίψιμο έγινε απλά ένας διαχωρισμός θετικού και αρνητικού φορτίου, τον οποίο μπορούμε να περιγράψουμε λέγοντας ότι από τη γάτα προς τη βούρτσα μεταβιβάστηκαν ηλεκτρόνια.

Ηλεκτρόνια ελεύθερα. Οι πιο συνηθισμένοι αγωγοί ηλεκτρισμού είναι ασφαλώς οι μεταλλικοί. Από μικροσκοπική άποψη αυτό που διαθέτουν τα μέταλλα και δεν το διαθέτουν οι μονωτές είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Όπως πιστεύεται σήμερα, στους μεταλλικούς αγωγούς, εκτός από τα *δέσμια* ηλεκτρόνια που «ανήκουν» στα άτομα, υπάρχουν και ηλεκτρόνια ελεύθερα, τα οποία κινούνται ανάμεσα στα άτομα και τα ιόντα του μετάλλου. Αποτελούν ένα είδος «ηλεκτρονικού αερίου», γιατί η κίνησή τους έχει χαρακτήρα άτακτο, ανάλογο με την κίνηση των μορίων κάθε αερίου σώματος.

Ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων ποικίλλει από μέταλλο σε μέταλλο, για όλα, όμως, η τάξη μεγέθους είναι γύρω στα 10^{23} ανά κυβικό εκατοστό. Στους μονωτές, η μεγάλη πλειοψηφία των ηλεκτρονίων ανήκει σε άτομα, πράγμα που σημαίνει ότι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ασήμαντος. Εκτός από τους αγωγούς και τους μονωτές υπάρχουν και οι ημιαγωγοί. Σε συνήθεις θερμοκρασίες περιέχουν 10^{13} ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά κυβικό εκατοστό. Βλέπουμε ότι ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων αποτελεί και κάποιο κριτήριο για τη διάκριση των σωμάτων σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές.

Θερμιονική εκπομπή (φαινόμενο Edison). Ένα ιδιαίτερα σημαντικό και με πολλές εφαρμογές φαινόμενο είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων από κάθε υψηλής θερμοκρασίας μέταλλο. Πράγματι εύκολα διαπιστώνεται ότι από πυρακτωμένο μεταλλικό νήμα εκπέμπονται ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούμε στη συνέχεια με ένα κατάλληλο ηλεκτρικό πεδίο να τα επιταχύνουμε –μέσα σε σωλήνα κενού– δημιουργώντας έτσι μία ηλεκτρονική δέσμη παρόμοια με τη δέσμη των καθοδικών ακτίνων. Το φαινόμενο έγινε γνωστό από τα πειράματα που έκανε στα 1884 ο μεγάλος Αμερικάνος εφευρέτης Thomas Edison (Τόμας Έντισον, 1847-1931).

Το ηλεκτρονιοβόλτ: Όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού 1V, το έργο που εκτελείται είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με το γινόμενο του στοιχειώδους φορτίου ($e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$C) επί τη διαφορά δυναμικού (1V). Με σύμβολα, $W = 1e \cdot 1V = 1eV$. Το 1eV με το όνομα «ένα ηλεκτρονιοβόλτ» χρησιμοποιείται ως μονάδα ενέργειας ($1eV = 1{,}6\ 10^{-19}$ J).

Το ηλεκτρικό φορτίο αποθηκεύεται

Οι περισσότεροι άνθρωποι της εποχής μας έχουν αρκετές φορές ασχοληθεί με κάποιον πυκνωτή κι έχουν αλλάξει τη χωρητικότητά του χωρίς να έχουν επίγνωση για το τι ακριβώς κάνουν εκείνη τη στιγμή. Πολλοί λίγοι ξέρουν ότι με την κίνηση που κάνουμε σ' ένα ραδιοφωνικό κουμπί (αυτό το οποίο γυρίζουμε ψάχνοντας για σταθμό), μεταβάλλουμε τη χωρητικότητα κάποιου πυκνωτή.

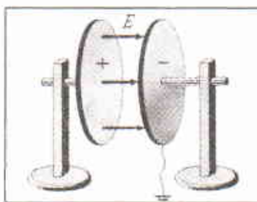
Ο πυκνωτής βρίσκεται μέσα στο ραδιόφωνο κι όσοι δεν το έχουμε ανοίξει, ίσως, δεν τον έχουμε δει ποτέ. Ακόμα πιο λίγοι ξέρουν τι ακριβώς είναι χωρητικότητα και τι πυκνωτής.

Οι πυκνωτές

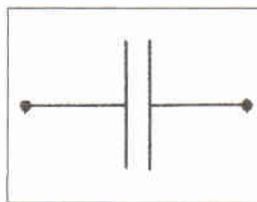
Οι πυκνωτές συγκαταλέγονται ανάμεσα στους βασικούς πρωταγωνιστές της ηλεκτρονικής, η οποία γνωρίζει αυτή την τόσο εντυπωσιακή και αλματώδη εξέλιξη. Χωρίς αυτούς, ίσως και να μην υπήρχε η σύγχρονη ηλεκτρονική. Η παραγωγή και η λήψη ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων, η μεταφορά σημάτων, η σταθεροποίηση της τάσης τροφοδοσίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων είναι ορισμένες μόνο από τις εφαρμογές που έχουν πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια πυκνωτών.

Τι είναι, όμως, πυκνωτής; Μπορούμε προκαταβολικά να πούμε ότι είναι ένα σύστημα δύο γειτονικών αγωγών, οι οποίοι χωρίς να συνδέονται αγώγιμα, είναι δυνατόν να φορτίζονται ο ένας με φορτίο θετικό και ο άλλος με απολύτως ίσο φορτίο αρνητικό. Μια βασική ιδιαιτερότητά του είναι ότι αποτελεί ένα είδος «δεξαμενής» ηλεκτρικών φορτίων. Σε διαφορετική γλώσσα μπορούμε να πούμε ότι σε κάθε πυκνωτή είναι δυνατόν να **αποθηκεύεται ηλεκτρικό φορτίο** και ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου.


Φωτογραφία



Σχηματική παράσταση


Συμβολισμός

Κάθε πυκνωτής αποτελείται από δύο κομμάτια μέταλλο, τα ο-

ποία βρίσκονται πάρα πολύ κοντά, χωρίς όμως να ακουμπάνε μεταξύ τους, πράγμα που σημαίνει ότι ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένα στρώμα από διηλεκτρικό που μπορεί να είναι αέρας, πλαστικό, παραφινωμένο χαρτί, μίκα, ορυκτέλαιο. Όταν φορτίζεται, οι δύο αγωγοί οι οποίοι λέγονται *οπλισμοί*, αποκτούν ηλεκτρικά φορτία κατά μέτρο ίσα και αντίθετα. Το φορτίο του θετικά φορτισμένου οπλισμού λέγεται και φορτίο του πυκνωτή (q).

Ένας τρόπος για να πετύχουμε τη φόρτισή του είναι να ακουμπήσουμε κάποιο θετικά φορτισμένο σώμα στον ένα οπλισμό, ενώ ο άλλος οπλισμός θα είναι γειωμένος. Το αποτέλεσμα θα είναι:

α) Ο ένας οπλισμός να εμφανίσει θετικό φορτίο περισσότερο από όσο θα εμφάνιζε αν ήταν απομονωμένος αγωγός.

β) Ο γειωμένος οπλισμός θα εμφανίσει αρνητικό φορτίο απολύτως ίσο.

Μεταξύ των δύο αγωγών υπάρχει διαφορά δυναμικού την οποία λέμε *τάση του πυκνωτή*. Το πείραμα μάς δείχνει ότι:

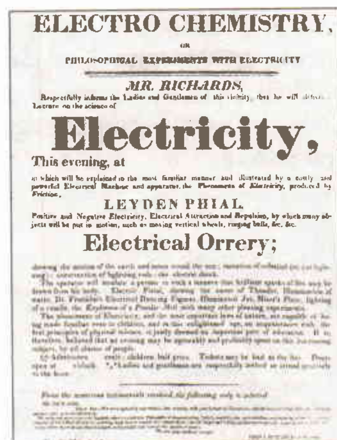
Το πηλίκο του φορτίου (q) προς τη διαφορά δυναμικού (V) έχει για κάθε πυκνωτή μια τιμή σταθερή, ανεξάρτητη δηλαδή από την τάση και το φορτίο.

Το πηλίκο αυτό λέγεται **χωρητικότητα (C) του πυκνωτή:** $\mathbf{C = \frac{q}{V}}$

και όπως θα δούμε εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του πυκνωτή και από τη φύση του διηλεκτρικού το οποίο υπάρχει μεταξύ των οπλισμών του.

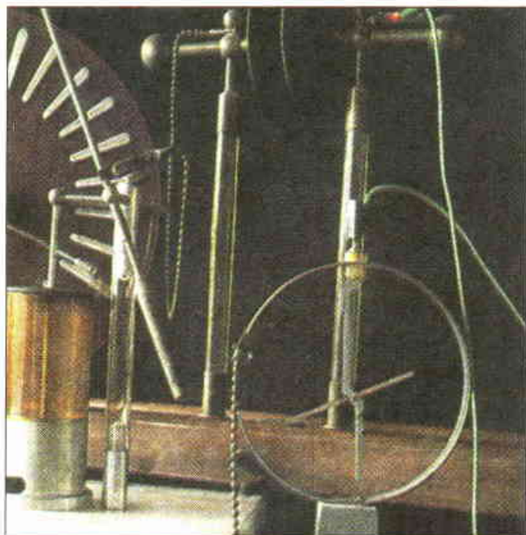
Η μονάδα μετρήσεως της χωρητικότητας είναι το 1 Farad. Συμβολίζεται με 1F.

$$1F = \frac{1C}{1V}$$



Εισιτήρια στο μπαρ

Στα 1829, για τις λαϊκές τάξεις, ο ηλεκτρισμός είναι ένα πράγμα μαγικό. Ένα πόστερ της χρονιάς εκείνης διαφημίζει την επίδειξη ηλεκτρικών «μαγικών» φαινομένων από κάποιον κύριο Ρίτσαρντς, ο οποίος καλεί τον κόσμο να παρακολουθήσει –με εισιτήριο– την παρουσίαση μιας πανάκριβης ηλεκτρικής μηχανής και ενός μεγάλου πυκνωτή.
Ανάμεσα σ' άλλα υπόσχεται ηλεκτρικές έλξεις και απώσεις με τις οποίες θα θέσει αντικείμενα σε κίνηση, κουδούνια που χτυπάνε και λοιπά και λοιπά. Κι ακόμα υπόσχεται ηλεκτρικό πιστόλι που θα δείχνει την αιτία του κεραυνού, ηλεκτρικές χορευτικές φιγούρες και άλλα. Είσοδος με τόσα σεντς. Για τα παιδιά μισό εισιτήριο. Εισιτήριο θα βρείτε στο μπαρ.



Φόρτιση και εκφόρτιση

1. Είδαμε ότι ηλεκτρίζοντας με επαφή τον ένα μόνο οπλισμό του πυκνωτή και διατηρώντας τον άλλο γειωμένο μπορούμε να πετύχουμε φόρτιση. Ο τρόπος αυτός δεν είναι, βέβαια, ο μοναδικός. Μπορούμε να φορτίσουμε έναν πυκνωτή ακουμπώντας σε καθένα από τους οπλισμούς έναν ακροδέκτη της μηχανής Whimshurst, ή να συνδέσουμε αγώγιμα τους οπλισμούς με τους πόλους μιας ηλεκτρικής στήλης και γενικότερα, με δύο σημεία κάποιου ηλεκτρικού κυκλώματος. Μία ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου μπορεί έτσι και **αποθηκεύεται.**

2. Όταν οι δύο οπλισμοί ακουμπήσουν ή συνδεθούν αγώγιμα, ο πυκνωτής εκφορτίζεται. Η αρχική διαφορά δυναμικού ελαττώνεται μέχρι να μηδενιστεί. Αυτό πραγματοποιείται με μετακίνηση θετικού φορτίου από τον οπλισμό μεγάλου δυναμικού προς τον οπλισμό μικρού δυναμικού ή μ' άλλα λόγια, με μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή

Όταν τραβάμε φωτογραφία με φλάς, το φως που βγαίνει συνδέεται με ενέργεια που ήταν αποθηκευμένη σε κάποιον πυκνωτή. Καθώς τραβάμε τη φωτογραφία ο πυκνωτής αποδίδει την ενέργειά του και εκφορτίζεται.

Καθώς ο αφόρτιστος πυκνωτής μετατρέπεται σε φορτισμένο, εκτελείται κάποιο έργο οπωσδήποτε. Αποδεικνύεται ότι το έργο αυτό είναι ίσο με $CV^2/2$, η τιμή του δηλαδή, εξαρτάται από την ποσότητα φορτίου που αποθηκεύτηκε στο συγκεκριμένο πυκνωτή και όχι από τον τρόπο που έγινε η φόρτιση. Μπορούμε συνεπώς να ισχυριστούμε ότι ο φορτισμένος πυκνωτής ακριβώς επειδή είναι φορτισμένος, έχει ενέργεια, ενέργεια δυναμική ως προς την κατάσταση στην οποία ήταν αφόρτιστος. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύτηκε στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή κατά τη διάρκεια της φόρτισής του με τη μορφή (δυναμικής) ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου. Είναι δυνατόν να αποδοθεί οποτεδήποτε συμβεί κάποια εκφόρτιση και η τιμή της είναι



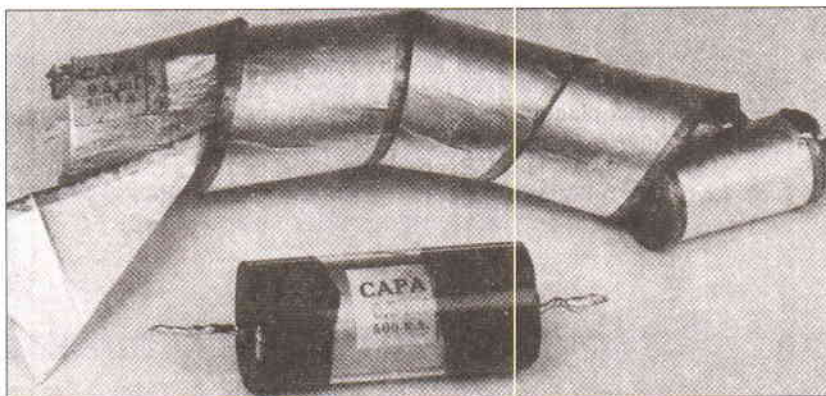
Διάφοροι τύποι σημερινών πυκνωτών. Αξίζει να συγκρίνουμε το μέγεθος των μικρών πυκνωτών με το μέγεθος του μολυβιού της φωτογραφίας.

$$U = \frac{1}{2} CV^2$$

Τα χαρακτηριστικά ενός πυκνωτή – που καθορίζουν και τη χωρητικότητά του– είναι:

- Η γεωμετρία του (σχήμα, μέγεθος και σχετική θέση των δύο οπλισμών) και
- Η φύση του διηλεκτρικού που βρίσκεται ανάμεσα στους οπλισμούς.

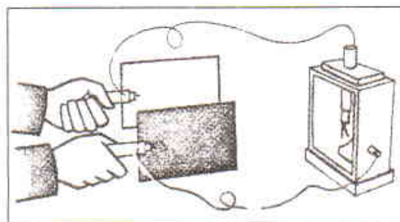
Αξίζει να προσεχθεί ότι η φύση του μετάλλου των δύο οπλισμών δεν συμμετέχει στην διαμόρφωση της χωρητικότητας. Αν, δηλαδή αντικαταστήσουμε τους χάλκινους οπλισμούς ενός πυκνωτή με δύο άλλους από αλουμίνιο, χωρίς να αλλοιώσουμε τα γεωμετρικά στοιχεία και το διηλεκτρικό που παρεμβάλλεται, η χωρητικότητα θα παραμείνει ίση με την προηγούμενη.





Επίπεδος πυκνωτής

Στην πιο απλή μορφή του ο πυκνωτής είναι επίπεδος. Αποτελείται δηλαδή από δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες, οι οποίες βρίσκονται η μία απέναντι στην άλλη. Συνήθως, οι πλάκες έχουν ίσα εμβαδά και όμοια σχήματα (κυκλικό ή ορθογώνιο). Στην περίπτωση κατά την οποία η απόσταση των αντικριστών επιφανειών των πλακών είναι πολύ μικρότερη από όλες τις διαστάσεις που καθορίζουν το εμβαδόν τους, το ηλεκτρικό πεδίο περιορίζεται πρακτικά στο χώρο ανάμεσα στις πλάκες και είναι ομογενές.



Χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή

Έχουμε πει προκαταβολικά ότι η χωρητικότητα κάθε πυκνωτή καθορίζεται από τη «γεωμετρία» του και από το διηλεκτρικό του. Στα παρακάτω θα επιδιώξουμε να ερευνήσουμε το όλο ζήτημα στην περίπτωση που ο πυκνωτής είναι επίπεδος.

1. Η πειραματική έρευνα. Συνδέομε τον έναν οπλισμό επίπεδου πυκνωτή με το (γειωμένο) περίβλημα του ηλεκτροσκοπίου. Ο άλλος οπλισμός συνδέεται με το δίσκο του ηλεκτροσκοπίου. Η απόκλιση των φύλλων μας δείχνει τη διαφορά δυναμικού των δύο οπλισμών.

α) Απομακρύνουμε τους οπλισμούς, οπότε το ηλεκτροσκόπιο μας δείχνει –εννοείται έμμεσα– ότι η διαφορά δυναμικού αυξήθηκε και κατά συνέπεια η χωρητικότητα ελαττώθηκε. Ακριβείς μετρήσεις δείχνουν ότι η χωρητικότητα είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης ℓ των οπλισμών (ή του πάχους του διηλεκτρικού που παρεμβάλλεται).

β) Χρησιμοποιούμε, τώρα, πυκνωτή με μεγαλύτερο εμβαδόν οπλισμών. Διαπιστώνουμε ότι η χωρητικότητα αυξάνεται. Ακριβείς μετρήσεις έχουν δείξει ότι η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή είναι ανάλογη προς το εμβαδόν S των οπλισμών του.

γ) Στα προηγούμενα πειράματα διηλεκτρικό ήταν ο αέρας. Αν, τώρα διατηρήσουμε σταθερή την απόσταση των οπλισμών και το εμβαδόν τους και «γεμίσουμε» το χώρο ανάμεσά τους με ένα άλλο μονωτικό σώμα, βλέπουμε εύκολα ότι η διαφορά δυναμικού ελαττώνεται, πράγμα που σημαίνει ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή αυξήθηκε.

Οι ακριβείς μετρήσεις στην περίπτωση αυτή αποκαλύπτουν ότι το *πόσες φορές* θα αυξηθεί η χωρητικότητα δεν εξαρτάται από τον συγκεκριμένο πυκνωτή. Καθορίζεται από τη φύση και μόνο του διηλεκτρικού. Αν, δηλαδή, χρησιμοποιήσουμε για διηλεκτρικό βακελίτη, η χωρητικότητα του πυκνωτή μας θα γίνει 4,8 φορές μεγαλύτερη από την αρχική. Εισάγοντας, στη συνέχεια, βακελίτη σ' έναν οποιονδήποτε άλλον πυκνωτή θα δούμε ότι η χωρητικότητά του γίνεται και πάλι 4,8 φορές μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός 4,8 αφορά αποκλειστικά και μόνο το βακελίτη. Αποτελεί, μ' άλλα λόγια, μια φυσική σταθερά αυτού του υλικού.

Κάθε μονωτής χαρακτηρίζεται από μια τέτοια φυσική σταθερά, η οποία λέγεται *διηλεκτρική σταθερά του μονωτή* και συνήθως συμβολίζεται με το γράμμα «ε». Ο ορισμός της δίνεται από την εξίσωση $\varepsilon = C/C_0$, όπου C η χωρητικότητα ενός οποιουδήποτε πυκνωτή με αυτό το διηλεκτρικό και C_0 η χωρητικότητα του ίδιου πυκνωτή

με διηλεκτρικό το κενό, ή κατά μεγάλη προσέγγιση τον αέρα. Για το κενό, δηλαδή, ισχύει, εξ ορισμού, ε = 1, ενώ για τα άλλα διηλεκτρικά είναι ε>1.

2. Θεωρητικά αποδεικνύεται ότι για τη χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή ισχύει:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{\ell}$$

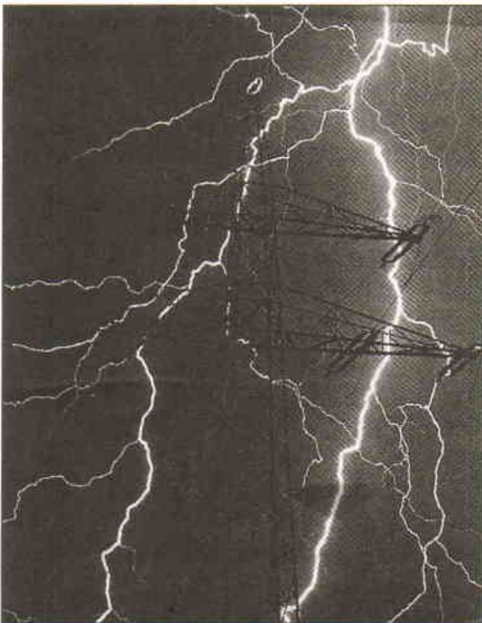
Σε περίπτωση, βέβαια, που υπάρχει κάποιο άλλο διηλεκτρικό –όχι κενό– θα έχουμε:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\ell}$$ **χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή**

Εφόσον το φορτίο παραμένει σταθερό, η παρουσία διηλεκτρικού ελαττώνει τη διαφορά δυναμικού επειδή εξασθενίζει το πεδίο.

Μπορούμε τώρα να ξαναγράψουμε την εξίσωση του νόμου Coulomb έτσι ώστε να ισχύει για αλληλεπίδραση φορτίων παρουσία οποιουδήποτε διηλεκτρικού

$F = \frac{k_{ηλ}}{\varepsilon}\frac{q_1 q_2}{r^2}$ και επειδή $k_{ηλ} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$ έχουμε $\mathbf{F = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}}$



Διηλεκτρική αντοχή

Αν επιμείνουμε να φορτίζουμε ολοένα και περισσότερο έναν πυκνωτή, το ηλεκτρικό πεδίο του θα μεγαλώνει συνεχώς. Αυτό δεν μπορεί να εξακολουθήσει επ' άπειρον. Σε κάποια στιγμή θα εκδηλωθεί σπινθήρας και ο πυκνωτής θα εκφορτιστεί αποδίδοντας την αποταμιευμένη στο ηλεκτρικό πεδίο του ενέργεια. Η εμφάνιση του σπινθήρα ήταν ένα μήνυμα ότι το διηλεκτρικό έπαψε να λειτουργεί μονωτικά, παρουσίασε, δηλαδή, αγωγιμότητα. Κάθε διηλεκτρικό έχει ορισμένη «αντοχή», που μετριέται με μονάδες έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Η αντοχή αυτή αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου μέχρι την οποία το διηλεκτρικό αποτελεί ένα μονωτή. Όταν η τιμή αυτή ξεπεραστεί το διηλεκτρικό σπάζει (τρυπάει) και λειτουργεί αγώγιμα.

Η διηλεκτρική αντοχή του αέρα είναι 8000 V/cm. Αυτό θα πει ότι για έναν πυκνωτή με αέρα, του οποίου οι οπλισμοί απέχουν 1cm, ξεσπάει ηλκετρικός σπινθήρας στην τάση

των 8000V, ενώ για έναν παρόμοιας γεωμετρίας πυκνωτή με διηλεκτρικό το χαρτί, ο σπινθήρας ξεσπάει γύρω στα 140000 V. Σπάσιμο διηλεκτρικού συμβαίνει και κατά την πτώση των κεραυνών.

Ο Benzamin Franklin ήταν ο πρώτος άνθρωπος που «είδε» τον κεραυνό ως μια εκφόρτιση ανάμεσα στο σύννεφο και τη Γη. Ο ίδιος ανακάλυψε ότι το ηλεκτρικό φορτίο προτιμά τις ακίδες και τις αιχμές και χρησιμοποίησε μια μεταλλική ράβδο, για να κατασκευάσει το πρώτο αλεξικέραυνο.

Πίνακας με τις σταθερές ορισμένων διηλεκτρικών

Υλικό	**Διηλεκτρική σταθερά**	**Διηλεκτρική αντοχή σε kV/mm**	**Υλικό**	**Διηλεκτρική σταθερά**	**Διηλεκτρική αντοχή σε kV/mm**
κενό	1	άπειρη	κεχριμπάρι	2,7	90
αέρας	1,00054	0,8	πορσελάνη	6,5	4
νερό	80	–	γυαλί Pyrex	4,5	13
χαρτί	3,5	14	βακελίτης	4,8	12
μίκα	5,4	160	πολυαιθυλένιο	2,3	50
χαλαζίας	3,8	8	Teflon	2,1	60

Το ηλεκτρικό φορτίο

1. *Ευθύνεται για τις ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις. Ασκεί οπωσδήποτε δύναμη –είτε ελκτική είτε απωστική–σε ηλεκτρικό φορτίο.*
2. *Εμφανίζεται με δύο τύπους· θετικό και αρνητικό.*
3. *Είναι δυνατόν να μεταβιβαστεί από ένα σώμα σ' ένα άλλο.*
4. *Μετακινείται μέσα σε αγώγιμα υλικά.*
5. *Θεωρείται ποσότητα την οποία μπορούμε να μετρήσουμε.*
6. *Εφόσον βρίσκεται σε κίνηση, αλληλεπιδρά με μαγνήτες.*
7. *Είναι κβαντισμένο, είναι δηλαδή πάντοτε ακέραιο πολλαπλάσιο ενός στοιχειώδους φορτίου.*
8. *Ως στοιχειώδες μεταφέρεται από δύο συγκεκριμένα σωματίδια· το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο.*
9. *Δεν δημιουργείται ούτε καταστρέφεται.*
10. *Είναι δυνατόν να αποθηκεύεται.*



Ερωτήσεις και προβλήματα

α. Θεωρούνται γνωστά:
Η σταθερά του νόμου Coulomb $k_{ηλ} = 9\cdot10^9\ Nm^2/C^2$, η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού $ε_0 = 1/4πk_{ηλ} = 8{,}85\cdot10^{-12}\ C^2/Nm^2$, το στοιχειώδες φορτίο $e = 1{,}6\cdot10^{-19}\ C$, η μάζα του ηλεκτρονίου $m_e = 9{,}11\cdot10^{-31}\ kg$, η μάζα του πρωτονίου $m_p = 1{,}67\cdot10^{-27}\ kg$ και η βαρυτική επιτάχυνση $g = 10\ m/s^2$.
β. Κάθε φορτισμένη σφαίρα που χαρακτηρίζεται μικρή να θεωρηθεί σημειακό ηλεκτρικό φορτίο.
γ. Όταν για το διηλεκτρικό ενός πυκνωτή δεν αναφέρεται τίποτα, θεωρήστε ότι υπάρχει αέρας με ε=1.



1.1. Ποια είναι η αρχική σημασία της λέξης *ηλεκτρισμός;*

1.2. Αναφέρετε τέσσερα φαινόμενα παρόμοια με αυτό που συμβαίνει όταν τρίβουμε το ήλεκτρο.

1.3. Σε τι μας εξυπηρετεί το ηλεκτρικό εκκρεμές;

1.4. Ποιο φορτίο ονομάζουμε θετικό; Ποιο ονομάζουμε αρνητικό;

1.5. Περιγράψτε ένα πείραμα από το οποίο να μπορούμε να συμπεράνουμε ότι μια χάλκινη ράβδος επιτρέπει τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου μέσα από αυτήν.

1.6. Σε τι μας εξυπηρετεί το ηλεκτροσκόπιο; Σε τι η ηλεκτροστατική μηχανή;

1.7. Η πορεία του Coulomb μέχρι τη διατύπωση του σχετικού νόμου ήταν ένας συγκερασμός θεωρητικής υποψίας και πειραματικής επιβεβαίωσης. Ποια ήταν η θεωρητική υποψία; Πως κατάφερε να μετρήσει ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου; Πως διατυπώνεται ο νόμος;

1.8. Το έτος 1600 εκδόθηκε το βιβλίο του Gilbert *'De Magnete'*, ένα ορόσημο για την εξέλιξη των ιδεών πάνω στον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό. Το πιο σημαντικό, σημείο του είναι η άποψη για την αιτία προσανατολισμού της μαγνητικής βελόνας. Ποια είναι η άποψη αυτή; Ποιο πείραμα πραγματοποίησε για να την υποστηρίξει;

1.9. Ποιες είναι οι βασικές ιδιότητες των μαγνητών;

1.10. Τι λέγεται ηλεκτρικό πεδίο; Πως δημιουργείται; Με ποιες έννοιες περιγράφεται;

1.11. Τι λέγεται ένταση ηλεκτρικού πεδίου; Ποια είναι η μονάδα μέτρησης του μεγέθους;

1.12. Σας ζητούμε να περιγράψετε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από σημειακό φορτίο.

1.13. Οι δυναμικές γραμμές ενός ηλεκτρικού πεδίου μάς δίνουν πληροφορίες για την ένταση του πεδίου. Σε ποιες παραδοχές βασίζονται οι πληροφορίες αυτές;

1.14. Σχεδιάστε τις δυναμικές γραμμές ενός ηλεκτρικού πεδίου το οποίο «πηγάζει» από δύο σημειακά φορτία +3μC και -1μC.

1.15. Τι λέγεται δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του; Ποια είναι η μονάδα μετρήσεως του μεγέθους;

1.16. Κατά τη φορά μιας δυναμικής γραμμής

τα δυναμικά ελαττώνονται. Πως αποδεικνύεται;

1.17. Ποιες απαντήσεις έδιναν οι φυσικοί του 1880 στα ερωτήματα
α) Υπάρχει άραγε κάποια εσωτερική δομή μέσα σε κάθε άτομο;
β) Ποια είναι η φύση του ηλεκτρικού φορτίου;
Ποιες απαντήσεις έδιναν οι φυσικοί του 1920 στα ίδια ερωτήματα; Τι εννοούσαν λέγοντας ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο;

1.18. Το 1879 ο William Crookes ανακάλυψε τις καθοδικές ακτίνες, η φύση των οποίων αποτέλεσε ένα αίνιγμα. Ποια ήταν η απάντηση που έδωσαν οι ερευνητές κατά τα επόμενα χρόνια; Ποιο γεγονός ενεθάρρυνε την απάντηση αυτή;

1.19. Αν τρίψουμε μια γάτα με μια βούρτσα η γάτα θα είναι θετικά φορτισμένη και η βούρτσα αρνητικά φορτισμένη. Σας ζητούμε να σχολιάσετε τη διατύπωση: «Δημιουργήθηκε ηλεκτρικό φορτίο».

1.20. Τι είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια; Πως είναι τα ηλεκτρόνια που δεν είναι ελεύθερα; Πως μπορούμε με κριτήριο τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων να διακρίνουμε τα σώματα σε αγωγούς, σε μονωτές και σε ημιαγωγούς;

1.21. Από τι αποτελείται ένας πυκνωτής;

1.22. Τι λέγεται χωρητικότητα ενός πυκνωτή; Από τι εξαρτάται;

1.23. Πώς μπορούμε να φορτίσουμε έναν πυκνωτή; Πως μπορούμε να τον εκφορτίσουμε;

1.24. Με ποια εξίσωση θα μπορούσαμε να απαντήσουμε στο ερώτημα «από τι εξαρτάται η χωρητικότητα ενός πυκνωτή;»



Να αναρωτηθούμε...

1.25. Θεωρήστε πέντε φορτισμένα σώματα Α, Β, Γ, Δ, Ε. Αν είναι γνωστό ότι το Α έλκει το Β, το Γ έλκει το Ε, το Β απωθεί το Ε, το Δ έλκει το Β και ότι το Δ είναι θετικά φορτισμένο, τι είδους φορτία φέρουν τα άλλα σώματα;



1.26. Γύρω στα 1730 ο Stephen Gray προσπαθούσε να ερευνήσει αν το ανθρώπινο σώμα είναι αγώγιμο. Λέγεται ότι κάποια μέρα ηλέκτρισε μια γυάλινη ράβδο και την ακούμπησε στα πόδια του υπηρέτη του, τον οποίο είχε προηγουμένως «κρεμάσει» με δύο γερά μετάξινα κορδόνια από το ταβάνι. Η μύτη του υπηρέτη τράβηξε τότε μικρά χαρτάκια που βρίσκονταν πάνω σ' ένα τραπέζι. Μπορείτε να εξηγήσετε το φαινόμενο;

1.27. Κρατάτε με το χέρι μια μεταλλική ράβδο και την τρίβετε πάνω σε μάλλινο ύφασμα. Η προσπάθεια σας να την φορτίσετε αποτυγχάνει. Γιατί άραγε; Με ποιον τρόπο θα μπορούσατε να τα καταφέρετε;



1.28. Μπορείτε να δικαιολογήσετε αυτό που συμβαίνει στα μαλλιά της κοπέλας;

1.29. Δύο αρνητικά σημειακά φορτία q_1 και q_2 βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση και

αλληλεπιδρούν. Σας ζητούμε να κάνετε ένα σχήμα και να σημειώσετε τη δύναμη που ασκεί το q_1 στο q_2 και σε ένα άλλο σχήμα να σημειώσετε τη δύναμη που ασκεί το q_2 στο q_1. Συμφωνείτε η διαφωνείτε με το ότι «αν πλησιάσουμε τα δύο φορτία στο μισό της προηγούμενης απόστασης θα διπλασιαστεί η τιμή της δύναμης»;

1.30. Συζητήστε τις ομοιότητες και τις διαφορές ανάμεσα στο νόμο της παγκόσμιας έλξης και στο νόμο του Coulomb.

1.31. Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις θεωρείτε σωστές;
α) Οι μαγνήτες έλκουν μόνο σιδερένια αντικείμενα.
β) Αν κρεμάσουμε κατάλληλα ένα ραβδομαγνήτη η μία του άκρη θα δείχνει πάντοτε τον βορρά.
γ) Ένας μαγνήτης μπορεί και να απωθεί τα ρινίσματα σιδήρου.
δ) Ένας μαγνήτης μπορεί να μαγνητίζει ορισμένα αντικείμενα είτε με επαφή είτε και χωρίς επαφή.

1.32. Οι μαγνήτες αλληλεπιδρούν με ηλεκτρικά φορτία;

1.33. Σας ζητούμε να περιγράψετε την αλληλεπίδραση δύο σημειακών φορτίων σύμφωνα με τη λογική α) της δράσης από απόσταση β) της έννοιας *πεδίο*.

1.34. Με ποιους τρόπους μπορούμε να πετύχουμε την απόκλιση μιας λεπτής δέσμης ηλεκτρονίων;

1.35. Επιβεβαιώστε ή απορρίψτε τους ακόλουθους ισχυρισμούς
α) Η δύναμη που ασκεί το ηλεκτρικό πεδίο σε ένα σημειακό φορτίο έχει πάντα τη φορά της έντασης.
β) Ένα θετικά φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται αρχικά ακίνητο θα μετατοπιστεί κατά τη φορά της έντασης.
γ) Ένα ηλεκτρόνιο αρχικά ακίνητο θα μετατοπιστεί κατά τη φορά αύξησης του δυναμικού.

1.36. Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά: Η ένταση ενός .... ηλεκτρικού πεδίου είναι σε όλα τα σημεία ίση με 40 N/C. Σε δύο σημεία Α και Β της ίδιας δυναμικής γραμμής τα δυναμικά είναι αντίστοιχα 14V και 10V και η κατεύθυνση της έντασης είναι από το .... προς το σημείο .... Αν ένα θετικό σημειακό φορτίο 30μC βρεθεί στο σημείο Α χωρίς ταχύτητα η δύναμη που θα ασκηθεί σ' αυτό θα έχει την κατεύθυνση της .... και θα είναι ίση με .... Κατά τη μετακίνηση του σημειακού φορτίου από το Α στο Β το ...... της δύναμης του πεδίου, η ποσότητα δηλαδή της μεταβιβαζόμενης .... από το πεδίο στο σημειακό φορτίο, θα είναι 120μJ.

1.37. Σε ένα ομογενές ηλεκτρικο πεδίο «αφήνουμε» θετικά φορτισμένα σωματίδια. Σας ζητούμε να προβλέψετε αυτό που θα συμβεί, περιγράφοντάς το με τέσσερις τρόπους, χρησιμοποιώντας δηλαδή (α) την έννοια *δύναμη* β) την έννοια *ένταση πεδίου* γ) την έννοια *δυναμικό πεδίου* και δ) την έννοια *δυναμική ενέργεια*.

1.38. Σε ένα ομογενές πεδίο «αφήνουμε» μικροσκοπικές βελόνες. Τι θα συμβεί;

1.39. Με ποιες από τις παρακάτω προτάσεις συμφωνείτε;
α) Το λάστιχο έχει μικρότερη αγωγιμότητα από το αλουμίνιο.
β) Σε κάθε κυβικό εκατοστό ξύλου υπάρχουν περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια από όσα σε κάθε κυβικό εκατοστό αργύρου.
γ) Σε κάθε κυβικό εκατοστό χαλκού υπάρχουν περισσότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια από όσα σε κάθε κυβικό εκατοστό γυαλιού και αυτό ερμηνεύει το ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του χαλκού είναι μεγαλύτερη από εκείνη του γυαλιού.

1.40. Ένας πυκνωτής:
α) Είναι σύστημα δύο γειτονικών αγωγών οι οποίοι χωρίς να συνδέονται αγώγιμα, είναι δυνατόν να φορτίζονται ο ένας με θετικό

φορτίο και ο άλλος με απολύτως ίσο αρνητικό φορτίο.
β) Περιορίζει ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μικρό όγκο.
γ) Συνιστά αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας.
δ) Είναι σύστημα δύο απομονωμένων αγωγών.
δ) Καθώς φορτίζεται αυξάνει η χωρητικότητά του.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

1.41. Το φορτίο ενός πυκνωτή:
α) Ισούται με το άθροισμα των φορτίων των δύο οπλισμών του.
β) Είναι ανάλογο προς την τάση του.
γ) Είναι ίσο με το πηλίκο της τάσης προ τη χωρητικότητα.
δ) Αυξάνει κατά τη φόρτιση.
ε) Διατηρείται κατά τη φόρτιση.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

1.42. Η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή αέρα:
α) Διπλασιάζεται εφόσον διπλασιαστεί το φορτίο του.
β) Υποδιπλασιάζεται εφόσον διπλασιαστεί η τάση του πυκνωτή.
γ) Είναι ανάλογη προς το εμβαδόν των οπλισμών.
δ) Ελαττώνεται αν μεταξύ των δύο οπλισμών παρεμβληθεί χαρτί.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

1.43. Αν συνδέσουμε αγώγιμα τους οπλισμούς ενός πυκνωτή:
α) Ελαττώνεται το φορτίο του.
β) Ελαττώνεται η χωρητικότητά του.
γ) Ελαττώνεται η αποθηκευμένη ενέργεια.
δ) Ο πυκνωτής εκφορτίζεται.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;



Να λύσουμε προβλήματα

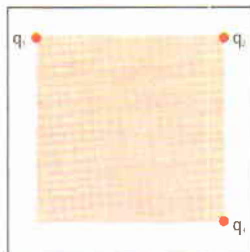
1.44. Δύο μικρές σφαίρες, με ίσα φορτία, βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση και αλληλεπιδρούν ηλεκτρικά. Τι θα συμβεί στην τιμή της δύναμης που ασκεί η μία στην άλλη αν **α.** Διπλασιάσουμε την απόστασή τους **β.** Διπλασιάσουμε το φορτίο κάθε μιας **γ.** Υποδιπλασιάσουμε την απόσταση, διπλασιάζοντας ταυτόχρονα το φορτίο κάθε μιας.

1.45. Στο μόριο του NaCl το ιόν του Na^+ απέχει από το ιόν του Cl^- $2{,}3 \cdot 10^{-10}$ m. Πόση είναι η μεταξύ τους ασκούμενη δύναμη;

1.46. Πόση είναι η απόσταση μεταξύ δύο ηλεκτρονίων, όταν η μεταξύ τους ηλεκτρική απωστική δύναμη είναι ίση με το βάρος του ηλεκτρονίου; ($g=9{,}81$ m/s^2).

1.47. Στο μοντέλο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα είναι $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m. Υπολογίστε τη δύναμη που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο.

1.48. Τρία ίσα σημειακά φορτία τοποθετούνται σε τρεις από τις κορυφές ενός τετραγώνου. Αν η δύναμη μεταξύ των q_1 και q_2 είναι $F_{1,2}$ και μεταξύ των q_1 και q_3 είναι $F_{1,3}$ ποια από τις παρακάτω τιμές ισούται με το λόγο $F_{1,2}/F_{1,3}$; **α.** 1/2 **β.** 2 **γ.** $1/\sqrt{2}$ **δ.** $\sqrt{2}$.



1.49. Το Gymnarchus miloticus είναι ένα ψάρι που ζει στα παράλια της Αφρικής. Στο κεφάλι του (Α) φέρει θετικό φορτίο 10^{-7} C ενώ στην ουρά του (Β) φέρει απολύτως ίσο φορτίο αρνητικό. Τα φορτία απέχουν μετα-

ξύ τους 20 cm. Υπολογίστε το μέτρο και την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται σε έναν ιόν υδροξυλίου (OH^-), που βρίσκεται στη μεσοκάθετο του AB και σε απόσταση 1m. Τη διηλεκτρική σταθερά του νερού θα τη βρείτε στο σχετικό πίνακα.

1.50. Ένα σημειακό αντικείμενο έχει μάζα 0,04 kg θετικό φορτίο 3μC και βρίσκεται σε σημείο Α ηλεκτρικού πεδίου. Η ασκούμενη στο αντικείμενο δύναμη είναι $6 \cdot 10^{-2}$ N. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε α) την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Α και β) την επιτάχυνση του αντικειμένου κατά τη στιγμή εκείνη.

1.51. Ένα σημειακό αντικείμενο Σ έχει φορτίο 3μC και ασκεί δύναμη F σε ένα άλλο σημειακό αντικείμενο Σ' φορτίου 1μC το οποίο βρίσκεται στο σημείο Β σε απόσταση 12 cm απο το Σ. Σας ζητούμε α) να προσδιορίσετε τη δύναμη F β) θεωρώντας το Σ πηγή του ηλεκτρικού πεδίου να προσδιορίσετε την ένταση του πεδίου στο σημείο Β.

1.52. Σε μια μικρή σταγόνα νερού υπάρχει «περίσσεια» 50 ηλεκτρονίων. Αν η σταγόνα βρεθεί σε κατακόρυφο ομογενές ηλεκτρικό πεδίο 50V/m είναι δυνατόν να διατηρηθεί ακίνητη; Μπορείτε να προσδιορίσετε τη μάζα της;

1.53. Ένα πρωτόνιο είναι ελεύθερο να κινείται σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο E=200 V/m. Υποθέτουμε ότι στο πρωτόνιο ασκείται μόνο η ηλεκτρική δύναμη. Σ' ένα σημείο Α του πεδίου η ταχύτητα του πρωτονίου είναι μηδέν. Υπολογίστε την ταχύτητά του σε σημείο Β που απέχει από το Α 2cm.

1.54. Ο πυκνωτής τους φλας μιας φωτογραφικής μηχανής έχει χωρητικότητα 150 μF και φορτίζεται με τάση 200V. **α.** Υπολογίστε την ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή **β.** Αν η εκφόρτιση παράγεται σε 1ms, υπολογίστε τη μέση ισχύ που αποδίδεται.

1.55. Κατά την εκφόρτιση ενός πυκνωτή απελευθερώνεται ενέργεια $3 \cdot 10^{-7}$J. 1. Αν η αρχική τάση του πυκνωτή ήταν $2 \cdot 10^4$V, υπολογίστε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που μετακινήθηκαν.

1.56. Ένα σύννεφο επιφάνειας S=1 km^2 βρίσκεται σε ύψος h=500 m και δημιουργεί με τη Γη πυκνωτή, τον οποίο μπορούμε να θεωρήσουμε επίπεδο. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ σύννεφου και Γης είναι $5 \cdot 10^5$V. **α.** Υπολογίστε τη χωρητικότητα του πυκνωτή και την ηλεκτρική του ενέργεια. **β.** Η εκφόρτιση προκαλεί κεραυνό που διαρκεί 10^{-6}s. Πόση είναι η μέση ισχύς που αποδίδεται;

1.57. Οι οπλισμοί ενός επίπεδου πυκνωτή είναι κυκλικοί δίσκοι ακτίνας 5 cm και απέχουν 1 mm **α.** Υπολογίστε τη χωρητικότητά του αν το διηλεκτρικό είναι μίκα (ε=8). **β.** Αν η τάση μεταξύ των οπλισμών είναι 500 V ποιο είναι το φορτίο του πυκνωτή; **γ.** Η προηγούμενη τάση διατηρείται σταθερή και βγάζουμε το διηλεκτρικό. Το φορτίο του πυκνωτή μεταβάλλεται; Αν ναι, ποια είναι η νέα του τιμή; **δ.** Πόση ενέργεια έχει τώρα ο πυκνωτής;

1.58. Το ανθρώπινο σώμα αποτελείται απο 10^{13} περίπου κύτταρα. Κάθε κύτταρο μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδος πυκνωτής, εφόσον η διάμετρός του είναι πολύ μεγαλύτερη από το πάχος της μεμβράνης του. Οι οπλισμοί του θα είναι από αγώγιμο ρευστό υλικό που βρίσκεται μέσα και έξω απο το κύτταρο. Η κυτταρική μεμβράνη είναι μέτριο διηλεκτρικό. Ζητείται **α.** το συνολικό φορτίο q όλων των κυττάρων του ανθρωπίνου σώματος και **β.** η συνολική αποθηκευμένη σ' αυτά ηλεκτρική ενέργεια. Για κάθε κυτταρική μεμβράνη δίνεται, κατά προσέγγιση, το εμβαδόν της επιφάνειας ($1,8 \cdot 10^{-9}m^2$), το πάχος ($8 \cdot 10^{-9}$m), η διαφορά δυναμικού (9mV) και η διηλεκτρική σταθερά (8).



Αποσπάσματα από το «Φυσικής Απάνθισμα» του Ρήγα

»Ὁ μαγνήτης εἶναι μία σιδηρώδης πέτρα, εὑρίσκεται μέσα του ἅλας καί λάδι ἑνωμένα, εἰς τά ὁποῖα κεῖται ἡ μαγνητική δύναμις, καί ὄχι εἰς τήν πετρώδη οὐσίαν.

»Κάθε κομμάτι μαγνήτου ἔχει δύο πόλους, εἰς τούς ὁποίους εἶναι ἡ μεγαλυτέρα ἑλκυστική δύναμις, καί τούς γνωρίζει τινάς κινῶντας ἕνα μαγνήτη ὁποιονδήποτε εἰς ῥινίσματα σιδήρου, ὅλα τά μόρια τῶν ῥινισμάτων ὁπού προσκολλῶνται εἰς αὐτόν, διευθύνονται πρός τόν ἕναν ἤ πρός τόν ἄλλον πόλον, καί ἐκεῖνα ὁπού εἶναι ἐπάνω εἰς τό λοιπόν σῶμα του, σηκώνονται ὀρθά ὡς ἀγκάθια. Προσέτι τά περισσότερα ῥινίσματα τραβοῦνται μέ περισσοτέραν ταχύτητα εἰς τούς πόλους, παρά εἰς τά ἄλλα μέρη του.

ΦΥΣΙΚΗΣ
ἈΠΑΝΘΙΣΜΑ
Διὰ τοὺς ἀγχίνους καὶ φιλομαθεῖς Ἕλληνας,
Ἐκ τῆς Γερμανικῆς καὶ Γαλλικῆς διαλέκτου ἐρρανισθὲν
Παρὰ τοῦ
ῬΗΓΑ
ΒΕΛΕΣΤΙΝΛΗ ΘΕΤΤΑΛΟΥ.
Οὗτινος ἀναλώμασιν ἐξεδόθη, πρὸς ὠφέλειαν
τῶν ὁμογενῶν.

ἘΝ ΒΙΕΝΝΗ.
Ἐκ τῆς Τυπογραφίας τοῦ Εὐγενοῦς ΤΡΑΤΤΝΕΡ.
1790.

»Διά τοῦτο ὀνομάζομεν ἄξωνα τοῦ μαγνήτου τήν εὐθεῖαν γραμμήν ὁποῦ διέρχεται ἀπό τόν ἕνα πόλον του, ἕως εἰς τόν ἄλλον, ἰσημερινόν του δέ, τό κατά κάθετον ἐπίπεδον ὁπού διαιρεῖ εἰς δύο τόν ἄξωνά του. Ἡ ἰδιότης λοιπόν αὐτή τοῦ μαγνήτου (τό νά ἔχῃ πόλους) εἶναι ἔμφυτος εἰς ὅλους τούς μαγνήτας, ἐπειδή καί ἄν τόν τζακίσῃ τινάς εἰς ὅσα κομμάτια καί ἄν θέλῃ, πάλιν οἱ δύο πόλοι θέλουν εὑρεθῇ πάντα εἰς κάθε κομμάτι.

»Ἔδωσαν τήν ὀνομασίαν τῶν πόλων τῆς γῆς καί εἰς τούς πόλους τοῦ μαγνήτου, ἐπειδή ὅταν αὐτός εἶναι ἐλεύθερος, ἔχει φύσιν νά διευθύνῃ πάντα τούς πόλους του πρός ἐκείνους τοῦ κόσμου μας.

»Δύο κομμάτια μαγνήτου ἴσα, βαλμένα εἰς δύο ξύλινα πινάκια, καί ἀφημένα εἰς νερόν ὁποῦ νά ἠρεμῇ (ὄχι τόσον μακράν ἕν ἀπό τό ἄλλο) θέλουν τραβιχθῇ ἀμοιβαίως, καί θέλουν ἀνταμωθῇ εἰς τόν μέσον τοῦ δρόμου των, μέ τήν διαφοράν ταύτην ὅμως, ὅτι ὁ ἀρκτικός πόλος τοῦ ἑνός, θέλει τραβίξει τόν ἀνταρκτικόν τοῦ ἄλλουνοῦ, ἐπειδή

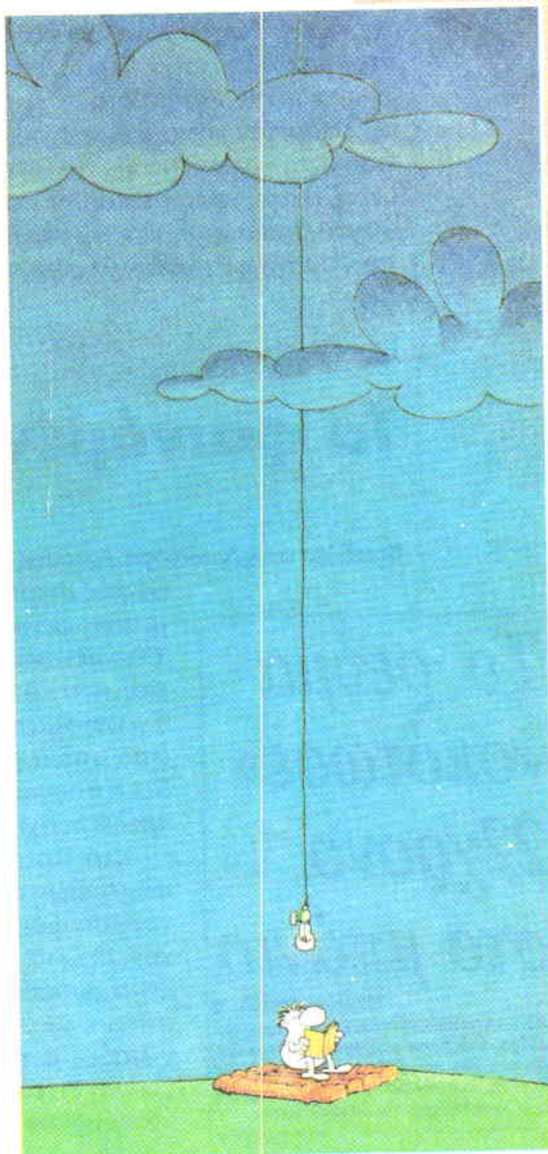
οἱ πόλοι τοῦ ἰδίου ὀνόματος, συναπωθοῦνται τόσον γλύγωρα, ὅσον ἀνθέλκονται οἱ ἐναλλάξ, εἰς τρόπον ὁποῦ εἶναι νόμος τοῦ μαγνητισμοῦ τοῦτος.

»Τό Ἤλεκτρον (κεχριμπάρι) εἶναι ἤ ὀρυκτόν, ἤ ῥιμμένον ἀπό τήν θάλασσαν εἰς τό περιγιάλι. Ἀμφότερα εἶναι εἶδος ῥετζίνης ἤ νάφθης πηγμένης, ἥτις τρέχουσα εἰς τήν θάλασσαν, ἀφ' οὗ ἀποκτήσῃ μίαν ποσότητα ἁλωτωδῶν μορίων, πήζει. Εὑρίσκεται εἰς τά περιγιάλια τῆς Προυσίας, οἱ ἐγκάτοικοι ὅταν εἶναι φουρτοῦνα πηγαίνουν καί τό μαζώνουν φοβούμενοι νά μήν τραβίξει πίσω ἡ θάλασσα τά κομμάτια, ὁποῦ ἔρριψεν ἔξω εἰς τήν ξηράν, τό ὀρυκτόν εὐγαίνει παντοῦ, εἰς τήν Ἰταλίαν, εἰς τήν Πολωνίαν, εἰς τήν Γερμανίαν, καί εἰς τήν Δανιμάρκα. Τό καλλίτερον καί περισσότερον εὐγαίνει εἰς τήν Πομερανίαν ἐπαρχίαν τῆς Προυσίας, ἀφ' οὗ σκάψουν τήν γῆν κομμάτι.



»Ἡ ἠλεκτρική ὕλη φαίνεται νά εἶναι ἐκείνη ὁποῦ, ὅταν τρίβωμεν ἕνα κομμάτι κεχριμπάρι εἰς ἕνα σῶμα ὥς νά ζεσταθῇ, καί τραβᾷ τρίχα ἤ ἄχυρον. Εἶναι μία ὕλη ῥευστοτάτη καί λεπτοτάτη, διαφορετική ἀπό κάθε ἄλλην διά τά ἀλλόκοτα παρεπόμενα ὁποῦ ἔχει, εἶναι ἱκανή νά ἑνωθῇ μέ ὅλα σχεδόν τά σώματα, πλήν μέ τινά μέν περισσότερον μέ τινά δέ ὀλιγώτερον. Τά παρεπόμενά της ἐνεργοῦνται μέ πολλά μεγάλην ταχύτητα διά ξεχωριστάς αἰτίας, αἵτινες ἀποτελοῦν φαινόμενα περιεργότατα.

Το ηλεκτρικό ρεύμα



Τα φαινόμενα • Αλληλεπιδράσεις ρευμάτων και μαγνητών • **Η θεωρία για το ηλεκτρικό ρεύμα** • Φορά του ηλεκτρικού ρεύματος • Το ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς. • **Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος** • Το αμπερόμετρο • Ιδιότητες της έντασης • **Η διαφορά δυναμικού** • Μέτρηση της τάσης • Ιδιότητες της τάσης • **Το ηλεκτρικό κύκλωμα** • Ηλεκτρική ενέργεια σε τμήμα κυκλώματος • **Αντιστάτες** • Ηλεκτρική αντίσταση • Ο νόμος του Ohm • Από τι εξάρτάται η αντίσταση; • Ρυθμιστική αντίσταση • Αντιστάτης και ηλεκτρική ενέργεια • Εφαρμογές • Σύνδεση αντιστατών • **Η γεννήτρια στο ηλεκτρικό κύκλωμα** • Ηλεκτρεγερτική δύναμη • Ο ενεργειακός ρόλος της γεννήτριας • ΗΕΔ και διαφορά δυναμικού • Κύκλωμα με γεννήτρια και αντιστάτη • Σύνδεση πηγών • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

Σήκω ψυχή μου δώσε ρεύμα
Διονύσης Σαββόπουλος

Ο κόσμος μας είναι ηλεκτρομαγνητικός. Ή τουλάχιστον *και* ηλεκτρομαγνητικός. Τα τελευταία εκατό χρόνια ο πολιτισμός σημαδεύεται από τα ηλεκτρικά ρεύματα και τις αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους μαγνήτες και σ' αυτά. Σήμερα οι αγωγοί της ΔΕΗ διασχίζουν τις πόλεις και την ύπαιθρο μεταφέροντας το αγαθό, ενώ οι καταναλωτικοί λογαριασμοί της ενοχλούν το μηνιαίο μας εισόδημα. Η κατανάλωση ηλεκτρισμού αποτελεί πια μέτρο για την ποιότητα της ζωής. Το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται στις καθημερινές κουβέντες μας κι έχει πια περάσει μεταφορικά, ακόμα και στην ποίηση. Τι είναι ηλεκτρικό ρεύμα;

Αξίζει τον κόπο να φτάσουμε σε μια ολοκληρωμένη απάντηση. Για να το καταφέρουμε θα ξεκινήσουμε από τα φαινόμενα. Παραμερίζοντας προς το παρόν, τα ηλεκτρονικά ας επιχειρήσουμε να συγκεντρώσουμε την προσοχή μας σε γεγονότα, από τα οποία προδίδεται η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος.

Τα φαινόμενα

Βραδάκι στη Λεωφόρο Αμαλίας της πρωτεύουσας. Ώρες κυκλοφοριακής αιχμής. Τα λεωφορεία έχουν ανάψει τα μεσαία φώτα τους. Το ίδιο ακριβώς και τα ταξί. Όλα μετακινούνται αργά εκτός από τα μηχανάκια, που καταφέρνουν και γλιστρούν ανάμεσα. Ένα σταματημένο γιωταχί φαίνεται πως έμεινε από μπαταρία και το ύφος του οδηγού προδίδει απόγνωση. Ένα ακόμη ακινητοποιημένο τρόλεϊ δυσχεραίνει την κατάσταση.

Στα πρωτοσέλιδα των απογευματινών εφημερίδων ο θάνατος από ηλεκτροπληξία του νεαρού φοιτητή. «Το ρεύμα σκότωσε 22χρονο». Η ζωή, όμως, προχωράει χωρίς να αλλάζει ο ρυθμός της σε τίποτα. Την ίδια ώρα σε σπίτια, μαγαζιά και εργοστάσια εκατοντάδες χιλιάδες μετρητές της ΔΕΗ δουλεύουν ταυτόχρονα. Καταγράφουν τις κιλοβατώρες που καταναλώνονται από χιλιάδες θερμοσίφωνες,

Το ρεύμα «σκότωσε» 22χρονο στο μπάνιο

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, 6
ΚΕΡΑΥΝΟΒΟΛΗΘΗΚΕ από ηλεκτρικό ρεύμα, ενώ έκανε μπάνιο στο λουτρό του σπιτιού του, φοιτητής της Πολυτεχνικής Σχολής, πιθανότατα από βραχυκύκλωμα που προκλήθηκε στο θερμοσίφωνο.



τοστιέρες, ηλεκτρικές σκούπες, στεγνωτήρες μαλλιών, βιομηχανικούς κινητήρες, κουζίνες, ασανσέρ, λαμπτήρες φωτισμού, ξυριστικές μηχανές, ψυγεία, ηλεκτρικά καλοριφέρ, μπλακ εντ ντέκερ, τόρνους, ηλεκτρικά σίδερα, ηλεκτρικά πλυντήρια. Η πολιτεία ζει μέσα από τον ηλεκτρομαγνητισμό. Εξαρτημένη από αυτόν ξεχνάει και να το ομολογήσει. Το θυμάται κάθε φορά που η βλάβη σε κάποιο υποσταθμό την αναγκάζει να το θυμηθεί.

Το ίδιο απόγευμα σε σχολικό εργαστήριο ο καθηγητής έχει μπροστά του ένα σωρό αντικείμενα. Σε λίγο δύο στήλες των έξι βολτ, ένας διακόπτης, μια σειρά από καλώδια, ένα μικρό λαμπάκι και ένα ηλεκτρολυτικό διάλυμα θειϊκού οξέος συνδέονται σε σειρά και δημιουργούν ηλεκτρικό κύκλωμα. Όταν ο καθηγητής κλείνει το διακόπτη, τρία διαφορετικά μηνύματα προδίδουν ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος. Το λαμπάκι ανάβει, η μαγνητική βελόνα, που βρισκόταν κάτω από ένα καλώδιο, μετακινείται και ισορροπεί σε μιαν άλλη θέση, στο ηλεκτρολυτικό διάλυμα παρατηρείται ηλεκτρόλυση· ανιχνεύεται οξυγόνο στην άνοδο και υδρογόνο στην κάθοδο.



Θα μπορούσε κανείς να μιλήσει για μια πολύ μεγάλη ποικιλία τέτοιων γεγονότων, που είναι συνυφασμένα με την καθημερινή μας ζωή. Από μια άλλη άποψη, όμως, η ποικιλία είναι φαινομενική. Σ' όλα αυτά τα γεγονότα υπάρχει ένας τουλάχιστον κοινός παρονομαστής. Δεν χρειάζεται να τον αναζητήσουμε. Τον ξέρουμε. Είναι **το ηλεκτρικό ρεύμα.** Τα γεγονότα είναι, όμως, πολλά κι έχουν ανάγκη από κάποια ομαδοποίηση. Θα την επιχειρήσουμε.



Πρώτη ομάδα φαινομένων. Σε μια κοινή ομάδα συγκαταλέγονται φαινόμενα, όπως η λειτουργία του θερμοσίφωνα, του σίδερου, της τοστιέρας, της κουζίνας και του ηλεκτρικού καλοριφέρ. Στην ίδια ομάδα ανήκει και αυτό που συμβαίνει όταν ανάψουν τα φώτα των αυτοκινήτων, το λαμπάκι στο εργαστήριο και οι λαμπτήρες πυρακτώσεως στα σπίτια και στα μαγαζιά. Διακρίνονται, βέβαια, από τα

προηγούμενα κατά το ότι σ' αυτά παράγεται και φως. Ένα κοινό στοιχείο, όμως, τα τοποθετεί όλα στην ίδια ομάδα. Δημιουργούνται σε μεταλλικούς αγωγούς και σε όλα **εκδηλώνεται θερμοκρασιακή αύξηση.** Ας μη μας διαφεύγει ότι η παραγωγή φωτός σε ηλεκτρικό λαμπτήρα πυρακτώσεως προϋποθέτει μια αύξηση της θερμοκρασίας του νήματος, που έχει ως συνέπεια την πυράκτωσή του.
Όλα, λοιπόν, τα φαινόμενα της πρώτης αυτής ομάδας μπορούμε να τα χαρακτηρίσουμε ως **φαινόμενα θερμικά.**

Δεύτερη ομάδα φαινομένων. Σε μια άλλη ομάδα ανήκουν φαινόμενα, όπως η ηλεκτροπληξία, το άδειασμα μιας μπαταρίας και η ηλεκτρόλυση θειϊκού οξέος που έγινε στο σχολικό εργαστήριο. Τα συνδέει το γεγονός ότι κατά την εξέλιξή τους **δημιουργούνται χημικές αντιδράσεις** σε ορισμένους –όχι μεταλλικούς– αγωγούς. Μπορούμε να τα θεωρήσουμε **φαινόμενα χημικά.**



Τρίτη ομάδα φαινομένων. Σε μια τρίτη, τέλος, ομάδα μπορούμε να τοποθετήσουμε φαινόμενα, όπως η λειτουργία του ασανσέρ, της σκούπας, του μπλακ εντ ντέκερ, του πλυντηρίου, της ξυριστικής μηχανής, του βιομηχανικού κινητήρα, του ψυγείου και του τρόλεϊ. Σ' όλα αυτά υπάρχει ένας κινητήρας ο οποίος δουλεύει με βάση **την αλληλεπίδραση ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητών.** Στην ίδια ομάδα πρέπει να κατατάξουμε και την εκτροπή της μαγνητικής βελόνας, φαινόμενο στο οποίο εκδηλώνεται η μία όψη αυτής της αλληλεπίδρασης.

Μπορούμε συνοψίζοντας να πούμε ότι υπάρχουν τρεις τουλάχιστον ομάδες φαινομένων, από τα οποία προδίδεται η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος.

α. Αύξηση της θερμοκρασίας των μεταλλικών αγωγών
β. Χημικές αντιδράσεις των ηλεκτρολυτών και
γ. Αλληλεπιδράσεις ρευμάτων και μαγνητών.

Αλληλεπιδράσεις ρευμάτων και μαγνητών

Το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Η μία όψη της αλληλεπίδρασης.

Εις την Φράντζιν έπεσε κεραυνός εις ένα σπίτι... και όντας εκεί ένα σεντούκι με μαχαίρια και πηρούνια, μερικά μεν ανέλυσαν, μερικά δε απόκτησαν μίαν μαγνητικήν δύναμιν όπου εσύκωναν χοντρά καρφιά.

Ρήγα Βελεστινλή, Φυσικής Απάνθισμα, 1790

Τι σχέση θα μπορούσε να έχει ο κεραυνός με τη μαγνήτιση και τα μαχαιροπήρουνα; Στα 1790 ο κεραυνός έχει πάψει να θεωρείται μαγικό φαινόμενο ή εξ ουρανού κατάρα των θεών. Ο Benjamin Franklin έχει πια πείσει την ανθρωπότητα ότι είναι μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου ανάμεσα στα σύννεφα και τη Γη. Καμιά σχέση, όμως, ανάμεσα στον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό δεν έχει γίνει ακόμα από κανέναν αποδεκτή. Δέκα χρόνια αργότερα μια πολύ σημαντική ανακάλυψη σφράγισε την παραπέρα εξέλιξη των γεγονότων. Ένας Ιταλός καθηγητής Φυσικής στο Πανεπιστήμιο της Παβία, ο Alessandro Volta (Αλεσσάντρο Βόλτα), πέτυχε να κατασκευάσει την πρώτη **ηλεκτρική στήλη,** μια διάταξη, δηλαδή, η οποία μπορούσε να διατηρεί αδιάκοπα μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους δύο πόλους της.

Η «βολταϊκή» στήλη ήταν σε θέση να προμηθεύσει με άφθονο, πλέον, ρεύμα τους Ευρωπαίους ερευνητές ανοίγοντάς τους έτσι απρόβλεπτους ορίζοντες στις πειραματικές αναζητήσεις τους.

Το πείραμα Oersted. Το κρίσιμο για την εξέλιξη του ηλεκτρομαγνητισμού πείραμα πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης είκοσι χρόνια αργότερα. Το καλοκαίρι του 1820, μ' ένα σύντομο κείμενό του γραμμένο στα λατινικά, ο Δανός Hans Christian Oersted (Χανς Κρίστιαν Έρστεντ, 1777-1851) ανακοίνωσε το αποτέλεσμα ενός πειράματος, το οποίο έδειχνε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα συνοδεύεται από μαγνητικά αποτελέσματα. Το πείραμα θεωρείται ιστορικό γιατί άνοιξε το δρόμο για την ενοποίηση του ηλεκτρισμού με τον μαγνητισμό, που μέχρι τότε είχαν προχωρήσει σε μονοπάτια εντελώς διαφορετικά.



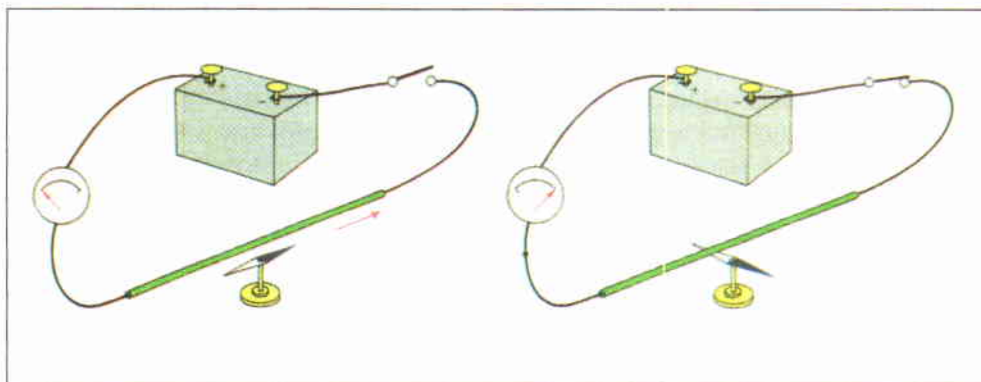
Αναμνηστική πλάκα, στην οποία παριστάνεται ο Hans Christian Oersted να εκτελεί το ιστορικό πείραμα.

Κοπεγχάγη, 21 Ιουλίου 1820

Τα πρώτα πειράματα πάνω στο ζήτημα, που αποτελεί το αντικείμενο αυτού του μνημονίου έγιναν κατά τη διάρκεια μαθημάτων που έκανα τον περασμένο χειμώνα πάνω στον ηλεκτρισμό, τον γαλβανισμό και τον μαγνητισμό. Η βασική τους συνέπεια είναι ότι η μαγνητική βελόνα μετακινήθηκε από τη θέση ισορροπίας της με τη δράση της βολταϊκής συσκευής και ότι αυτό το αποτέλεσμα παράγεται όταν το κύκλωμα είναι κλειστό και όχι όταν είναι ανοιχτό...

Hans Christian Oersted

Δεν είναι δύσκολο να αναπαράγουμε το πείραμα είτε στο σχολικό εργαστήριο είτε και μόνοι μας. Χρησιμοποιοούμε μία ηλεκτρική στήλη και ένα μακρύ καλώδιο, τις άκρες του οποίου ακουμπάμε στους δύο πόλους της. Αν διαθέτουμε κι ένα διακόπτη στο κύκλωμα, θα είναι ακόμα καλύτερα. Τεντώνουμε τώρα το ρευματοφόρο καλώδιο και το τοποθετούμε πάνω από μία μαγνητική βελόνα, που μέχρι εκείνη τη στιγμή ήταν προσανατολισμένη κατά το γήινο μαγνητικό πεδίο Β. Διαπιστώνουμε ότι αν βάλουμε τον αγωγό σε θέση παράλληλη προς τον άξονα της βελόνας, η βελόνα θα εκτραπεί από την αρχική της θέση, θα εκτελέσει ορισμένες στροφικές ταλαντώσεις και θα ισορροπήσει σε



μια θέση διαφορετική. Το μήνυμα είναι σαφές. Το ηλεκτρικό ρεύμα επιδρά πάνω στη μαγνητική βελόνα. Είναι η μία όψη της αλληλεπίδρασης ρευμάτων και μαγνητών. Μπορούμε να την περιγράψουμε λέγοντας ότι **το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.**

Το μαγνητικό πεδίο επιδρά στο ηλεκτρικό ρεύμα. Η άλλη όψη της αλληλεπίδρασης. Η ανακοίνωση του Oersted έφτασε στο Παρίσι μία βδομάδα αργότερα και ανέβασε κατακόρυφα το ενδιαφέρον των Γάλλων φυσικών για τον ηλεκτρομαγνητισμό. Από τη χρονιά εκείνη οι επιφανέστεροι φυσικοί της Γαλλίας είτε μόνοι τους είτε σε συνεργασία μεταξύ τους θα προχωρήσουν σε παραπέρα πειραματικές έρευνες πάνω στην ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, θα αναζητήσουν τις εφαρμογές, που υποσχόταν η νέα αυτή ανακάλυψη αλλά και θα επιχειρήσουν να δημιουργήσουν μια θεωρητική βάση για την καινούργια επιστήμη του ηλεκτρομαγνητισμού. Ανάμεσά τους ο André Marie Ampère (Αντρέ Μαρί Αμπέρ, 1775-1836) υπήρξε, κατά κάποιο τρόπο, ο επικεφαλής. Την επίδραση ενός μαγνήτη σε ρευματοφόρο αγωγό μπορούμε να τη διαπιστώσουμε εύκολα στο εργαστήριο. Χρειάζεται να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, τέτοιο ώστε ένας από τους αγωγούς να βρεθεί σε θέση που να μπορεί να μετακινείται ελεύθερα.

Τοποθετούμε έναν πεταλοειδή μαγνήτη σε θέση τέτοια ώστε ένα τμήμα του αγωγού να βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο ομογενές και να είναι κάθετο προς τις δυναμικές γραμμές του. Ρευματοδοτούμε το κύκλωμα και αμέσως διαπιστώνουμε ότι ο αγωγός μετακινείται, ένδειξη ότι το μαγνητικό πεδίο επιδρά επάνω του.

Η επίδραση του μαγνητικού πεδίου στο ηλεκτρικό ρεύμα είναι γεγονός. Η δύναμη, με την οποία εκδηλώνεται, έχει επικρατήσει να λέγεται **δύναμη Laplace.** Θα προχωρήσουμε σε βαθύτερη μελέτη της σε ένα από τα επόμενα κεφάλαια.

Μπορούμε, λοιπόν, για την ανίχνευση ηλεκτρικού ρεύματος να έχουμε ένα ακόμα κριτήριο. Την επίδραση, την οποία υφίσταται από ένα μαγνήτη. Η δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία δημιουργείται μέσα σ' ένα σωλήνα καθοδικών ακτίνων, αποτελεί ηλεκτρικό ρεύμα επειδή υφίσταται επίδραση από μαγνητικό πεδίο. Η λειτουργία των ηλεκτρικών κινητήρων βασίζεται σ' αυτήν ακριβώς την επίδραση. Μέσα σε κάθε ηλεκτρικό κινητήρα βρίσκεται οπωσδήποτε ένας μαγνήτης και συρμάτινα κινητά πλαίσια τα οποία, εφόσον ρευματοδοτηθούν, δέχονται δυνάμεις Laplace από τον μαγνήτη οπότε έτσι συντηρείται η περιστροφική τους κίνηση.

Η θεωρία για το ηλεκτρικό ρεύμα

Το δεύτερο κεφάλαιο ξεκίνησε, ουσιαστικά με το ερώτημα: *τι είναι ηλεκτρικό ρεύμα;* Η απάντηση, την οποία επιχειρήσαμε να δώσουμε «είδε» το ζήτημα μόνο από την πλευρά των **φαινομένων.** Στη συνέχεια τα ομαδοποιήσαμε εστιάζοντας την προσοχή μας στο πιο σημαντικό από αυτά, που είναι η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση.

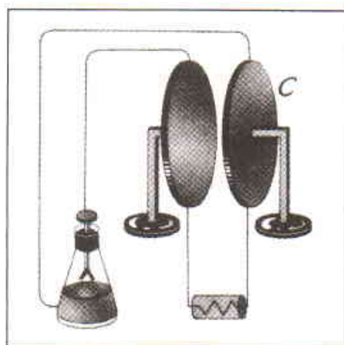
Λείπει, όμως η ενοποιητική **θεωρία.** Η απάντηση, δηλαδή, στο ερώτημα: *ποια θεωρία ασπάζεται σήμερα η επιστήμη γι' αυτό που συμβαίνει στην ύλη κάθε φορά που –μακροσκοπικά– εκδηλώνεται ηλεκτρικό ρεύμα;* Η απάντηση αυτή θα έρθει εύκολα αρκεί να δώσουμε περισσότερη προσοχή σε σκόρπιες παρατηρήσεις, στις οποίες έχουμε ήδη αναφερθεί και αν επιχειρήσουμε να συνθέσουμε τα συμπεράσματα.

Η πρώτη παρατήρηση. Στο εργαστήριο το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργήθηκε επειδή

α. Ανάμεσα στους δύο πόλους υπήρχε μια μόνιμη διαφορά δυναμικού.

β. Συνδέσαμε τους δύο πόλους της στήλης με αγώγιμο υλικό.

Η δεύτερη παρατήρηση. Κατά την εκφόρτιση ενός πυκνωτή η μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου συνοδεύεται, ενδεχόμενα, από σπινθήρα, είτε από άναμμα του φλάς της φωτογραφικής μηχανής είτε και από την αύξηση θερμοκρασίας του μετάλλου, με το οποίο συνδέσαμε αγώγιμα τους δύο οπλισμούς. Μια ισχυρή, τέλος, εκφόρτιση, όπως ο κεραυνός, δημιουργεί και μαγνητικό πεδίο ισχυρότατο.



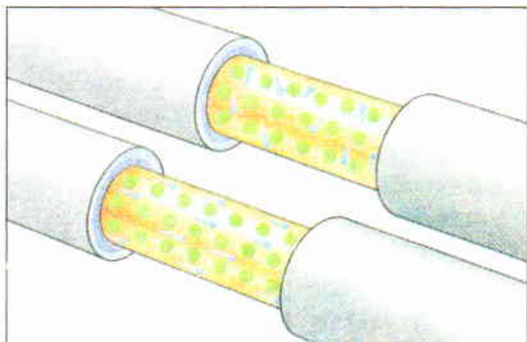


Είναι, δηλαδή, γεγονός ότι η μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου, που συμβαίνει κατά την εκφόρτιση των πυκνωτών συνοδεύεται από θερμικά και μαγνητικά φαινόμενα παρόμοια με εκείνα που συνοδεύουν τα ηλεκτρικά ρεύματα.

Η τρίτη παρατήρηση. Επιστρέφουμε στο πείραμα Rowland, το οποίο μας έδειξε ότι το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο επιδρά σε μαγνήτες. Ξεκινώντας από το μήνυμα του πειράματός του ο ίδιος ο Rowland υπολόγισε πως, όταν ένα σημειακό φορτίο εκτελεί κυκλική κίνηση, σε μια μικρή μαγνητική βελόνα, που βρίσκεται στο κέντρο της τροχιάς του, δημιουργείται εκτροπή παρόμοια με εκείνη που δημιουργείται από ένα κυκλικό ρευματοφόρο σύρμα, εφόσον η βελόνα βρεθεί στο κέντρο του.

Οι τρεις αυτές παρατηρήσεις αποτελούν ορισμένα από τα επιχειρήματα τα οποία μας οδηγούν να δεχτούμε ότι:

Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι κατευθυνόμενη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, η οποία συμβαίνει μέσα στους αγωγούς εξ αιτίας κάποιας διαφοράς δυναμικού.



Αυτό, δηλαδή, που συμβαίνει μέσα στους μεταλλικούς αγωγούς, όταν εφαρμόζουμε διαφορά δυναμικού και αυξάνεται η θερμοκρασία τους, παρουσιάζει κάτι κοινό με αυτό που συμβαίνει σε **κάθε** αγωγό και τον κάνει να αλληλεπιδρά με μαγνήτες, αλλά και μ' αυτό που συμβαίνει κατά την ηλεκτρόλυση. Είναι η κίνηση ηλεκτρικού φορτίου με ορισμένη κατεύθυνση. Η κίνηση γίνεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται στο εσωτερικό των αγωγών από τους πόλους της ηλεκτρικής στήλης ή από οποιαδήποτε άλλη αιτία.

Φορείς του κινουμένου φορτίου στα μέταλλα είναι αποκλειστικά και μόνο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, στους ηλεκτρολύτες είναι τα ιόντα, στους αέριους αγωγούς μπορεί να είναι και ιόντα και ηλεκτρόνια.

Φορά του ηλεκτρικού ρεύματος

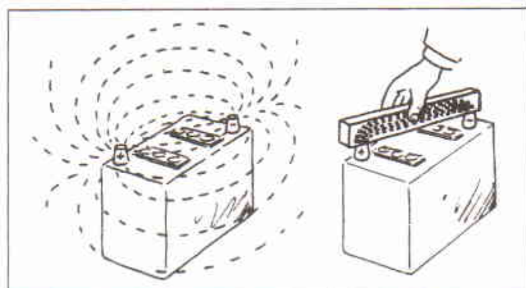
Επιστρέφουμε στα φαινόμενα. Όταν αντιστρέψαμε τους πόλους της πηγής, είδαμε ότι η εκτροπή της μαγνητικής βελόνας έγινε κατά την αντίθετη φορά. Αν κάνουμε το ίδιο κατά την τροφοδότηση διαλύματος θειϊκού οξέος θα δούμε να ελυθερώνεται υδρογόνο στο ηλεκτρόδιο από το οποίο πριν έβγαινε οξυγόνο. Αντίθετα, ο λα-

μπτήρας φωτοβολεί το ίδιο, ανεξάρτητα από την πολικότητα της τροφοδότησης. Ξέρουμε ότι με την αντιστροφή της πολικότητας, αντιστρέφουμε τη φορά του ηλεκτρικού πεδίου άρα και τη φορά κίνησης των ηλεκτρικών φορέων μέσα στους αγωγούς. Το συμπέρασμα είναι ότι ορισμένες εκδηλώσεις του ηλεκτρικού ρεύματος (τα χημικά φαινόμενα και η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση) επηρεάζονται από τη φορά κατά την οποία κινούνται οι ηλεκτρικοί φορείς. Λογικό, λοιπόν, είναι να θεωρήσουμε για το ηλεκτρικό ρεύμα κάποια φορά. Φορά του ηλεκτρικού ρεύματος θα μπορούσε να είναι είτε η φορά κίνησης αρνητικών φορτίων από μικρά δυναμικά προς μεγαλύτερα είτε και η φορά κίνησης των θετικών φορτίων από μεγάλα δυναμικά προς μικρότερα.

Έχει επικρατήσει ως φορά του ηλεκτρικού ρεύματος να θεωρείται η φορά κίνησης του θετικού φορτίου. Η σύμβαση αυτή είχε προταθεί από τον Ampére. Είναι μια επιλογή, η οποία αργότερα αποδείχτηκε «ατυχής» γιατί στους πιο συνηθισμένους αγωγούς, τους μεταλλικούς, η φορά ρεύματος είναι αντίθετη από τη φορά κίνησης των φορέων, οι οποίοι συμβαίνει να είναι ηλεκτρόνια. Βέβαια αν οι φυσικοί του 18ου αιώνα ήξεραν για ηλεκτρόνια θα είχαν, ίσως, προτείνει αντίθετους ορισμούς και θα ονόμαζαν θετικό το φορτίο του εβονίτη και αρνητικό το φορτίο του γυαλιού. Σ' αυτή την περίπτωση θα είχαμε σήμερα αρνητικά φορτισμένους πυρήνες και θετικό φορτίο στα ηλεκτρόνια και θα μας ήταν πιο βολικό η φορά κίνησης των ηλεκτρονίων στα μέταλλα να συμπίπτει με τη φορά του ρεύματος. Εννοείται ότι για τα φαινόμενα δεν θα άλλαζε τίποτα. Θα διατηρήσουμε λοιπόν τη σύμβαση που έχει επικρατήσει και **ως φορά ρεύματος θα θεωρούμε την αντίθετη από τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων.**

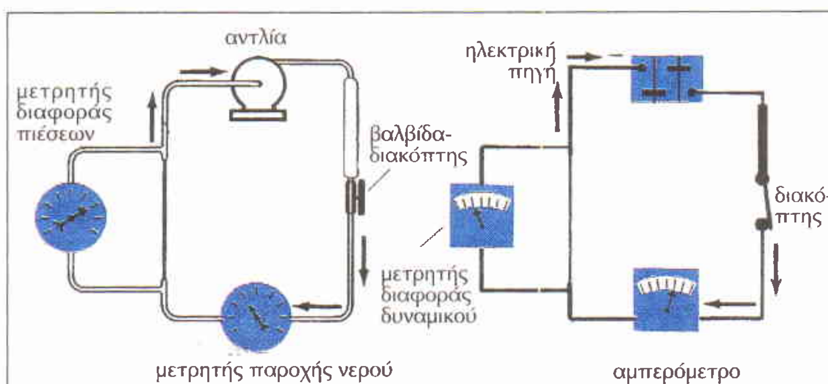
Το ηλεκτρικό ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς

Όπως έγραφε και ο Volta στην έκθεσή του, τα δύο ελάσματα –πόλοι της ηλεκτρικής στήλης συμπεριφέρονται σαν φορτισμένοι αγωγοί και η διαφορά από τους οπλισμούς ενός πυκνωτή είναι ότι, παρά τη συνεχή «εκφόρτιση» εξαιτίας κάποιου μηχανισμού, ανανεώνεται το φορτίο τους και διατηρείται το ηλεκτρικό τους πεδίο και η μεταξύ τους διαφορά δυναμικού. Με ανάλογο τρόπο συμπεριφέρεται και ο συσσωρευτής, που χρησιμοποιούμε σε μοτοσικλέτες και αυτοκίνητα, όπως και οι βιομηχανικές γεννήτριες. Θα χρησιμοποιούμε για όλα αυτά τον όρο «ηλεκτρική πηγή».



Όταν ένας μεταλλικός αγωγός συνδεθεί με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής, στο εσωτερικό του αγωγού και σε κάθε σημείο του δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο.

Ο ρόλος, λοιπόν, της ηλεκτρικής πηγής στο κύκλωμα δεν είναι να παράγει ηλεκτρικά φορτία. Η πηγή, δηλαδή, δεν είναι «πηγή» ηλεκτρικού φορτίου. Διατηρεί, όμως, το πεδίο και τη διαφορά δυναμικού, όπως με ανάλογο τρόπο, *μια αντλία νερού σ' ένα υδραυλικό κύκλωμα δεν παράγει νερό, αλλά χρησιμεύει για να διατηρεί κάποια διαφορά πιέσεων και να προκαλεί τη ροή του ήδη υπάρχοντος νερού.* Αντίστοιχα, *η ηλεκτρική πηγή δημιουργεί διαφορά δυναμικού και πεδίο μέσα στο οποίο γίνεται η ροή των ήδη υπαρχόντων ελεύθερων ηλεκτρονίων του μετάλλου.*



Το ηλεκτρικό πεδίο επιδρά στα ελεύθερα ηλεκτρόνια κατά τη γνωστή κατεύθυνση. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων αυξάνει συνεχώς προς την ίδια κατεύθυνση.

Τα ηλεκτρόνια συγκρούονται (αλληλεπιδρούν) με τα δομικά συστατικά –ιόντα– των μεταλλικών αγωγών, με συνέπεια η κινητική ενέργεια των επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων (αυτή που θα αποκτούσαν επιπλέον αν δεν υπήρχε το ιοντικό πλέγμα) να μετατρέπεται σε ενέργεια ταλάντωσης των ιόντων και να εκδηλώνεται μακροσκοπικά η αύξηση της θερμοκρασίας του μεταλλικού αγωγού. Το γνωστό, δηλαδή, «θερμικό» φαινόμενο που συνοδεύει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από τους μεταλλικούς αγωγούς και λέγεται και φαινόμενο Joule. Το αποτέλεσμα για τα ηλεκτρόνια είναι καθένα από αυτά να μην επιταχύνεται συνεχώς αλλά να κινείται με σταθερή (οριακή) «ρευματική» ταχύτητα.

Ενα ακόμα σημείο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα. Πριν από την

εμφάνιση του ηλεκτρικού πεδίου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου –ηλεκτρονικό αέριο– εκινούντο άτακτα, χωρίς δηλαδή, «να εκδηλώνουν κάποια προτίμηση » προς ορισμένη κατεύθυνση έτσι που αν σε μια διατομή χάλκινου σύρματος περνούν ορισμένα ηλεκτρόνια, κινούμενα προς ορισμένη κατεύθυνση, την ίδια στιγμή ισάριθμα ηλεκτρόνια περνούν από την ίδια διατομή κινούμενα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Μπορούμε να πούμε ότι συνολικά η κίνηση των ηλεκτρονίων –στο ηλεκτρονικό αέριο– αναιρείται παρόλο που οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων είναι της τάξης των km/s. Ας σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές της ταχύτητας σχετίζονται με τη θερμοκρασία του μετάλλου, γι' αυτό και η κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων λέγεται και «θερμική» κίνηση.



Όταν, τώρα, εμφανιστεί το ηλεκτρικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια του ρεύματος δεν «χάνουν» την προηγούμενη ταχύτητά τους, αλλά σ' αυτήν προστίθεται διανυσματικά –σύμφωνα με την αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων– και η μικρή ρευματική ταχύτητα της μετακίνησής τους.

Αυτή η εξαιρετικά «διστακτική» διαδικασία, στην οποία παίρνει μέρος ένας τρομακτικά μεγάλος αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι το ηλεκτρικό ρεύμα ή μάλλον η «μικρο-εικόνα» που έχουμε φτιάξει γι' αυτό. Μια αργή, δηλαδή, μετακίνηση του ηλεκτρονικού αερίου μέσα στον ενδοατομικό χώρο προς ορισμένη, κάθε στιγμή, κατεύθυνση. Τα ηλεκτρόνια, λοιπόν, μέσα στο μεταλλικό σύρμα δεν μετακινούνται με κεραυνοβόλα ταχύτητα. Μόλις κλείσουμε το διακόπτη αυτό που ταξιδεύει με τρομερά μεγάλη ταχύτητα η οποία μπορεί να πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός, είναι το «σήμα για την αφύπνισή» τους, δηλαδή το ηλεκτρικό πεδίο, που διαδίδεται μέσα στον αγωγό.

Χρειάζεται, ίσως, να συνοψίσουμε. Όταν έχουμε ηλεκτρικό ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις διαφορετικές ταχύτητες.

1. Την ταχύτητα της θερμικής κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων, η οποία διατηρείται, ως συνιστώσα, και μετά την εμφάνιση ηλεκτρικού πεδίου. Το μέγεθος της είναι της τάξης των km/s.

2. Την πολύ μικρή ταχύτητα –με μέγεθος της τάξης του 1mm/s– με την οποία μετακινείται το ηλεκτρονικό αέριο και δημιουργείται το ηλεκτρικό ρεύμα.

3. Την τρομερά μεγάλη ταχύτητα, με την οποία διαδίδεται το ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον αγωγό.

Ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

Πόσο ρεύμα; Από τη στιγμή, λοιπόν, που δεχόμαστε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι κατευθυνόμενη κίνηση ηλεκτρικού φορτίου, είναι λογικό να συμφωνήσουμε ότι ένα μέγεθος που θα μπορούσε να μετράει την ποσότητα ρεύματος είναι η ανά μονάδα χρόνου ποσότητα φορτίου, που περνάει από μια διατομή του αγωγού, **το πηλίκο,** μ' άλλα λόγια, **του φορτίου (q) προς την αντίστοιχη χρονική διάρκεια (t).** Το μέγεθος λέγεται **ένταση ρεύματος** ή απλά **ρεύμα.** Συμβολίζεται με το γράμμα I. Ο ορισμός που μας δίνεται από την εξίσωση

$$I = \frac{q}{t}$$

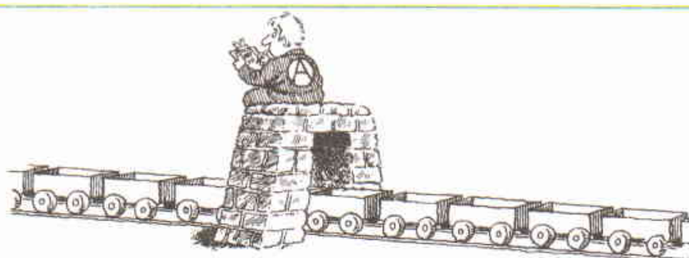
ισχύει για την περίπτωση που το πηλίκο q/t έχει την ίδια τιμή για οποιαδήποτε χρονική διάρκεια, οπότε λέμε και ότι η ένταση είναι χρονικά σταθερή, χαρακτηρίζοντας το ρεύμα ως συνεχές και σταθερό.

Στη γενική περίπτωση όπου το ρεύμα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο η ένταση του ρεύματος (I) οφείλει να αναφέρεται σε μία χρονική στιγμή. Ο ορισμός της βασίζεται στις έννοιες *στοιχειώδης ποσότητα φορτίου* και *στοιχειώδης χρονική διάρκεια.* Με ανάλογο τρόπο μπορούμε να ορίσουμε και άλλες έννοιες που αναφέρονται σε χρονική στιγμή όπως η ταχύτητα, η επιτάχυνση και η ισχύς.

Στο Διεθνές Σύστημα, η ένταση ρεύματος (ρεύμα) αποτελεί θεμελιώδες μέγεθος με μονάδα μετρήσεως το ένα **Ampère (1A).**

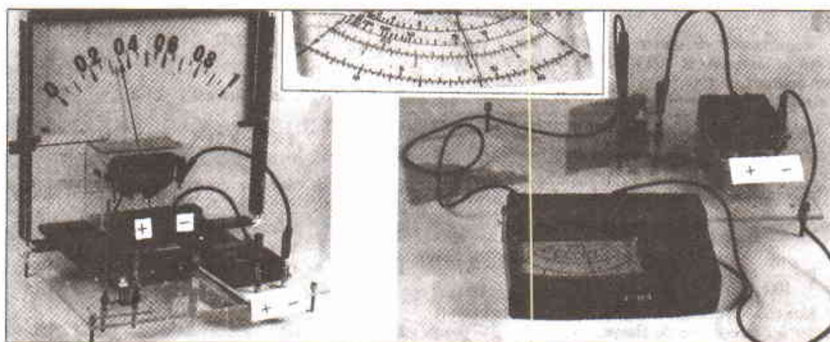
Ισχύει 1 Ampère= 1Coulomb/1seconde. Η εξίσωση αυτή αποτελεί την εξίσωση ορισμού της μονάδος Coulomb. 1C = 1As.

Συχνά χρησιμοποιείται το 1 mA = 10^{-3}A.

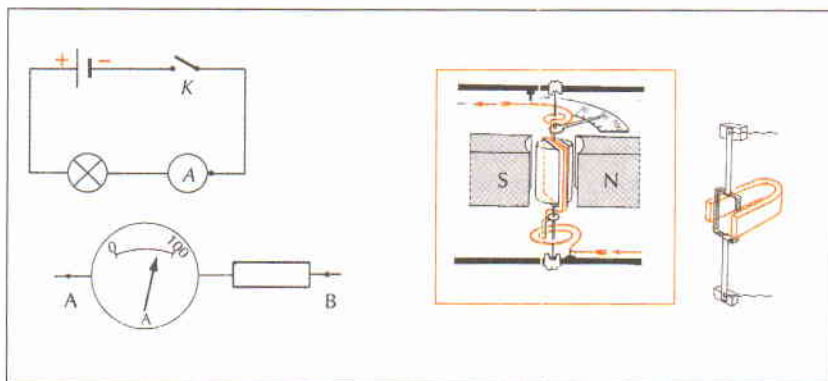


Υποτίθεται ότι κάθε βαγονάκι αντιστοιχεί σε ένα Coulomb φορτίου. Ο καταμετρητής μετράει πόσα Coulomb φορτίου περνούν από τη διατομή ανά δευτερόλεπτο, μετράει, δηλαδή, τα Ampère ηλεκτρικού ρεύματος.
Εννοείται ότι τέτοιου είδους καταμετρητές δεν υπάρχουν. Όπως θα δούμε αμέσως παρακάτω την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος τη μετράμε βασιζόμενοι στα θερμικά ή στα μαγνητικά φαινόμενα που συνοδεύουν την εμφάνισή του.

Το αμπερόμετρο



Χρειαζόμαστε και όργανα που να μας μετρούν τα Αμπέρ ηλεκτρικού ρεύματος. Τέτοια όργανα υπάρχουν σε διάφορους τύπους, όλα, όμως, έχουν το ίδιο όνομα. Αμπερόμετρα. Παρεμβάλλονται στο ηλεκτρικό κύκλωμα, στο σημείο ακριβώς που θέλουμε να μετρήσουμε. Διακόπτουμε, δηλαδή, το κύκλωμα στο σημείο αυτό και τα δύο άκρα που δημιουργούνται τα συνδέουμε με τους δύο ακροδέ-

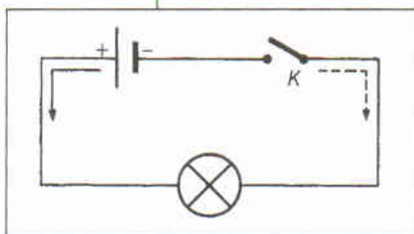


κτες του οργάνου. Έτσι, από το αμπερόμετρο θα διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα ίδιας* έντασης με αυτό, που είχαμε προηγουμένως. Το αμπερόμετρο, μ' ένα δείκτη που διαθέτει, «δείχνει», λοιπόν, το ρεύμα «του». Η απόκλιση του δείκτη είναι συνέπεια κάποιου φαινομένου, το οποίο εκδηλώνεται όταν περνάει ρεύμα μέσα από το

** Η παρουσία του οργάνου αλλοιώνει λίγο ή πολύ το ρεύμα που υπήρχε πριν από την παρεμβολή. Η αλλοίωση περιορίζεται, όπως θα δούμε, αν η εσωτερική αντίσταση του οργάνου είναι αμελητέα σε σχέση με την αντίσταση του αγωγού, του οποίου το ρεύμα θέλουμε να μετρήσουμε.*

αμπερόμετρο, σε τρόπο, μάλιστα, ώστε η απόκλιση να είναι ανάλογη προς το ρεύμα (Ι) αυτό. Το φαινόμενο είναι ένα από εκείνα, που συνοδεύουν τα ηλεκτρικά ρεύματα. Συνήθως είναι είτε θερμικό φαινόμενο (θερμικά αμπερόμετρα) είτε αλληλεπίδραση του ρεύματος με κάποιο μαγνήτη. Σ' αυτήν την περίπτωση μέσα στο αμπερόμετρο υπάρχει μαγνήτης ακίνητος και στρεφόμενο πλαίσιο, που συνδέεται με τον δείκτη. Το ρεύμα, που διοχετεύεται στο αμπερόμετρο ρευματοδοτεί το στρεφόμενο πλαίσιο οπότε στις πλευρές του ασκούνται από το μαγνήτη δυνάμεις Laplace και το πλαίσιο στρέφεται. Μαζί του στρέφεται και ο δείκτης τον οποίο βλέπουμε εξωτερικά. Εννοείται ότι αναφερθήκαμε μόνο στην αρχή λειτουργίας του οργάνου. Η συνολική λειτουργία του είναι, βέβαια, πολύ πιο σύνθετη.

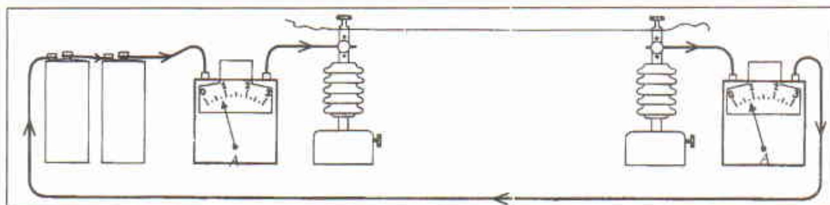
Υπάρχει μια παράδοση, που θέλει τα σχήματα, με τα οποία παριστάνονται τα ηλεκτρικά κυκλώματα, να έχουν ως σκελετό κάποιο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο και να κυριαρχούν οι ευθείες γραμμές. Την παράδοση θα τη διατηρήσουμε. Ωστόσο δεν θα ήταν, ίσως, περιττό να θυμίσουμε ότι *τα σχήματα δεν απεικονίζουν φωτογραφικά την πραγματικότητα, αλλά τη συμβολίζουν*. Η πραγματικότητα ενός εργαστηριακού κυκλώματος με ηλεκτρική στήλη, διακόπτη και λαμπτήρα παριστάνεται με το σχήμα το οποίο μας παραπέμπει σ' αυτήν. Τα δύο άνισα και παράλληλα ευθύγραμμα τμήματα Ι παριστάνουν ηλεκτρική πηγή σταθερής διαφοράς δυναμικού. Το μεγαλύτερο από τα δύο συμβολίζει τον πόλο με το μεγαλύτερο δυναμικό. Αν τα δύο τμήματα ήταν ίσα ΙΙ θα παρίσταναν έναν οποιονδήποτε πυκνωτή. Το σχήμα ⊗ παριστάνει ηλεκτρικό λαμπτήρα –ανιχνευτή ενώ το διακόπτη ανοιχτό. Ορισμένα ακόμα σύμβολα είναι:



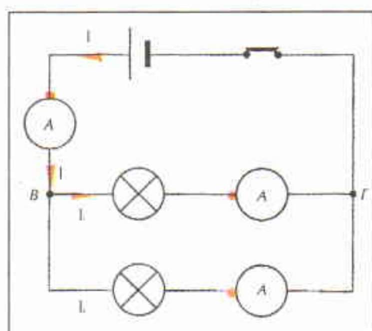
- γείωση
- (A) αμπερόμετρο
- (V) βολτόμετρο
- ή αντιστάτης
- ή λαμπτήρας
- πηνίο
- μεταβλητός πυκνωτής
- ροοστάτης
- ηλεκτρολυτική συσκευή (βολτάμετρο)
- δίοδος
- εναλλασσόμενο ρεύμα

Ιδιότητες της έντασης

1. Το πρώτο μήνυμα που μπορούμε να πάρουμε από τις ενδείξεις των αμπερομέτρων είναι η «κοινή» τιμή, την οποια έχει το ρεύμα σε



μια ορισμένη στιγμή κατά μήκος ενός αγωγού. Εφόσον, δηλαδή, σε όλο το μήκος του αγωγού δεν υπάρχει διακλάδωση, οι ταυτόχρονες ενδείξεις οσωνδήποτε αμπερόμετρων θα συμπίπτουν. Η ισότητα των ενδείξεων αιτιολογείται με την αρχή της διατήρησης του φορτίου. Όσο φορτίο διακινείται ανά μονάδα χρόνου μέσα από κάποια διατομή, άλλο τόσο –ίσο– φορτίο θα διακινείται ανά μονάδα χρόνου και μέσα από μια άλλη διατομή, οποιαδήποτε. Ας προσέξουμε εδώ ότι δεν μιλάμε για ισότητα των ταχυτήτων των ηλεκτρονίων (του ηλεκτρονικού αερίου). Στις μικρές διατομές οι ταχύτητες των ηλεκτρονίων είναι συγκριτικά μεγαλύτερες. Μιλάμε, όμως, για ισότητα στις ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου, που διακινούνται ανά μονάδα χρόνου μέσα στον αγωγό. Κατά μήκος, δηλαδή, ενός ρευματοφόρου αγωγού δεν υπάρχουν ούτε πηγές ούτε καταβόθρες φορτίου.



2. Τα πράγματα είναι διαφορετικά εφόσον υπάρχει διακλάδωση (κόμβος). Στο κύκλωμα του σχήματος, για παράδειγμα, οι ενδείξεις των τριών αμπερομέτρων είναι $I = 330$ mA, $I_1 = 110$ mA και $I_2 = 220$ mA. Μας δείχνουν, δηλαδή, ότι $I_1+I_2 = I$. Το γεγονός αιτιολογείται –και πάλι– από την αρχή της διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου και γενικεύεται με την παρακάτω πρόταση.

Το άθροισμα των ρευμάτων που «πλησιάζουν» σ' έναν κόμβο είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων που «απομακρύνονται» από αυτόν.

Η πρόταση αποτελεί το λεγόμενο **πρώτο κανόνα του Kirchhoff.** Λέγεται κανόνας επειδή δεν αποτελεί κάποιον ιδιαίτερο νόμο της φυσικής αλλά αναφέρεται σε μια τεχνική, την οποία μπορούμε να χρησιμοποιούμε όταν κάνουμε υπολογισμούς στα κυκλώματα. Χαρακτηρίζεται *πρώτος* επειδή συμβαίνει να υπάρχει ένας ακόμα κανόνας Kirchhoff ο οποίος αναφέρεται στις διαφορές δυναμικού.

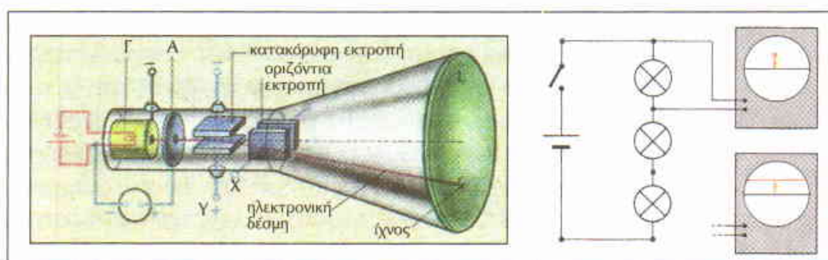
Ο Gustav Kirchhoff (Γκούσταβ Κίρχοφ), τέλος, ο οποίος διατύπωσε και τους δύο κανόνες, υπήρξε ένας ονομαστός Γερμανός φυσικός που έζησε από το 1824 μέχρι το 1887.

Η διαφορά δυναμικού

Μέτρηση της τάσης

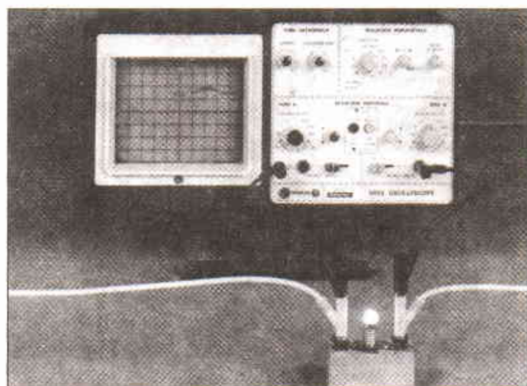
Ανάμεσα σε δύο σημεία ενός κυκλώματος υπάρχει –στη γενική περίπτωση– μια διαφορά δυναμικού ή, όπως συνηθίζεται να λέμε, κάποια τάση. Δύο από τα όργανα με τα οποία θα μπορούσαμε να τη μετρήσουμε είναι ο ηλεκτρονικός παλμογραφος και το βολτόμετρο.

Ο παλμογράφος αποτελείται κυρίως από ένα σωλήνα κενού, μία φθορίζουσα οθόνη, μία διάταξη για δημιουργία ηλεκτρονικής δέσμης καθώς και διατάξεις για την εκτροπή της δέσμης, όπως είναι, παραδείγματος χάριν, ένα ζεύγος από οριζόντια πλακίδια, τα

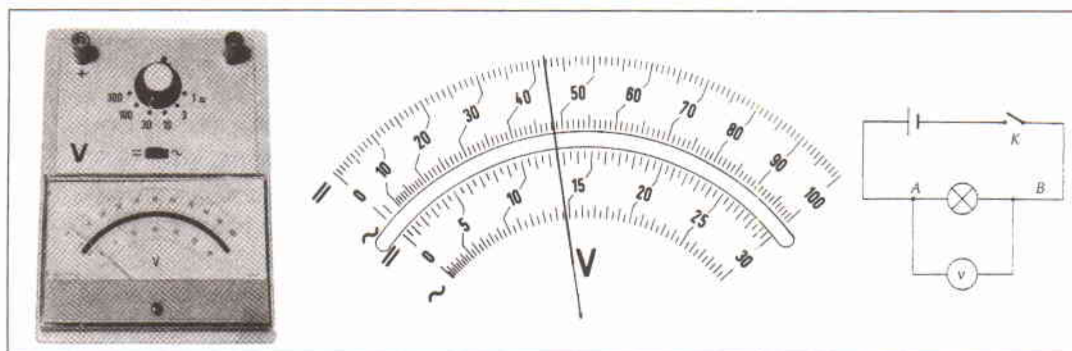


οποία εκτρέπουν τη δέσμη κατακόρυφα κι ένα ζεύγος από κατακόρυφα πλακίδια από τα οποία η δέσμη εκτρέπεται οριζόντια. Αν στο προηγούμενο κύκλωμα θελήσουμε να μετρήσουμε την τάση ανάμεσα στα σημεία Α και Γ, συνδέουμε τα σημεία αυτά με τα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης, οπότε στην οθόνη το αρχικό ίχνος της ηλεκτρονικής δέσμης θα μετακινηθεί κατά μία απόσταση την οποία εύκολα μπορούμε να αναγάγουμε σε Volts.

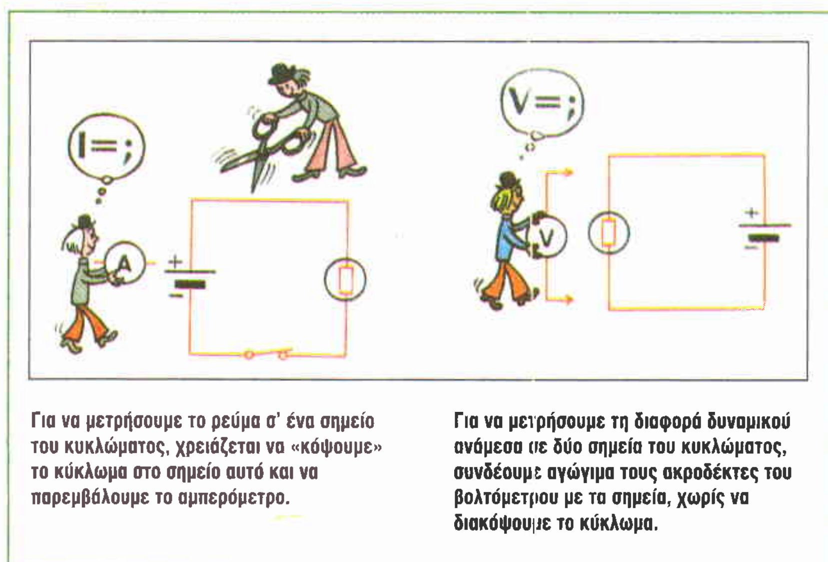
Το βολτόμετρο. Ο ηλεκτρονικός παλμογράφος είναι ακριβής αλλά είναι βαρύς και δύσκολα μεταφέρεται. Από αυτή, λοιπόν, την άποψη το βολτόμετρο πλεονεκτεί. Δεν διαφέρει από το αμπερόμετρο ούτε σε λειτουργία ούτε σε εμφάνιση. Το καντράν του είναι, βέβαια, βαθμολογημένο σε Volts (V). Το κοινό βολτόμετρο διαθέτει ακίνητο μαγνήτη και αγώγιμο πλαίσιο. Το πλαίσιο ρευματοδοτούμενο αλληλεπιδρά με τον μαγνήτη και στρέφεται, οπότε στρέφεται και ο δείκτης που συνδέεται μ' αυτό. Η εκτροπή του δείκτη είναι ανάλογη του ρεύματος με



συνέπεια –σύμφωνα με τον νόμο Ohm, που θα μελετήσουμε αργότερα – να είναι ανάλογη και προς τη διαφορά δυναμικού.



Το βολτόμετρο, λοιπόν, μετράει τη διαφορά δυναμικού, που υπάρχει ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες «του». Όταν θελήσουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία Α, Β ενός κυκλώματος, συνδέουμε αγώγιμα τους ακροδέκτες με τα σημεία αυτά. Η τάση ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες –την οποία δείχνει το όργανο– θα είναι ίση και με την τάση ανάμεσα στα Α και Β. Η σύνδεση αυτή του βολτόμετρου λέγεται **σύνδεση σε διακλάδωση.** Από το βολτόμετρο θα περάσει, βέβαια, ρεύμα και η τάση την οποία θέλουμε να μετρήσουμε θα αλλοιωθεί. Το σφάλμα περιορίζεται αν η αντίσταση του βολτομέτρου είναι –σε σχέση με την αντίσταση του αγωγού ΑΒ– ασήμαντη.



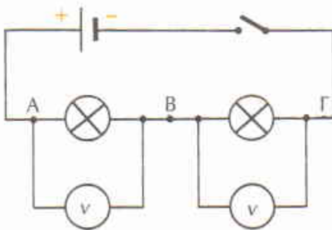
Για να μετρήσουμε το ρεύμα σ' ένα σημείο του κυκλώματος, χρειάζεται να «κόψουμε» το κύκλωμα στο σημείο αυτό και να παρεμβάλουμε το αμπερόμετρο.

Για να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα σε δύο σημεία του κυκλώματος, συνδέουμε αγώγιμα τους ακροδέκτες του βολτόμετρου με τα σημεία, χωρίς να διακόψουμε το κύκλωμα.

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι:

Στα ηλεκτρικά κυκλώματα η τάση (διαφορά δυναμικού) αναφέρεται σε δύο ορισμένα σημεία του κυκλώματος τα οποία αποτελούν και άκρα κάποιου τμήματος. Είναι μέγεθος αλγεβρικό, μπορεί δηλαδή, η τιμή της να είναι θετική, αρνητική ή μηδέν. Μπορούμε να την μετρήσουμε, είτε με παλμογράφο είτε με βολτόμετρο.

Ιδιότητες της τάσης



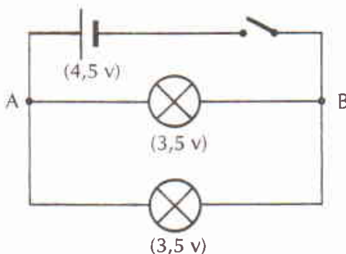
1. Δημιουργούμε ένα κύκλωμα με ηλεκτρική στήλη, διακόπτη και δύο λαμπτήρες, τους οποίους συνδέουμε σε σειρά. Με κατάλληλα βολτόμετρα μετράμε τις τάσεις $V_{ΑΒ}$, $V_{ΒΓ}$, $V_{ΑΓ}$, και βρίσκουμε $V_{ΑΒ} = 2{,}9V$, $V_{ΒΓ} = 1{,}45$ V και $V_{ΑΓ} = 4{,}35$ V. Το σύμπερασμα είναι ότι $V_{ΑΓ} = V_{ΑΒ}+V_{ΒΓ}$ και γενικεύεται με την εξής διατύπωση:

Η τάση στα άκρα ενός συνόλου αγωγών –σε σειρά– είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων που υπάρχουν σε καθέναν από αυτούς τους αγωγούς.

Η προηγούμενη εξίσωση γράφεται και $V_{ΑΒ}+V_{ΒΓ}+(-V_{ΑΓ}) = 0$. Επειδή, όμως $-V_{ΑΓ} = V_{ΓΑ}$, θα ισχύει και $V_{ΑΓ}+V_{ΒΓ}+V_{ΓΑ} = 0$. Σε μία γενικευμένη διατύπωση μπορούμε συνεπώς να πούμε ότι:

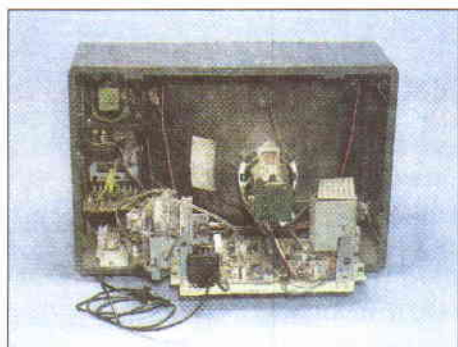
Κατά μήκος ενός κλειστού κυκλώματος το αλγεβρικό άθροισμα των διαφορών δυναμικού είναι ίσο με μηδέν. Η πρόταση αποτελεί τον λεγόμενο **δεύτερο κανόνα Kirchhoff.** Χαρακτηρίζεται *κανόνας* –και όχι ως νόμος– επειδή αναφέρεται, ουσιαστικά, σε μια τεχνική που μας βοηθάει να κάνουμε υπολογισμούς στα ηλεκτρικά κυκλώματα, χωρίς να αποτελεί κάποιον ανεξάρτητο νόμο της φυσικής, γιατί «καλύπτεται» από τις γενικές αρχές για τη διατήρηση του φορτίου και τη διατήρηση της ενέργειας. Είδαμε ότι κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τον πρώτο κανόνα Kirchhoff, ο οποίος καλύπτεται από την αρχή της διατήρησης του φορτίου.

2. Φτιάχνουμε ένα ακόμα κύκλωμα με ηλεκτρική στήλη 4,5 V, διακόπτη και δύο λαμπτήρες, τα άκρα των οποίων συνδέονται ανά δύο αγώγιμα όπως στο σχήμα. Δημιουργούνται έτσι δύο διακλαδώσεις, η Α και η Β. Είναι αυτονόητο ότι, αν θελήσουμε να μετρήσουμε τις τάσεις στα άκρα κάθε λαμπτήρα, θα πάρουμε το ίδιο αποτέλεσμα, για τον απλούστατο λόγο ότι οι λαμπτήρες έχουν κοινά άκρα. Η σύνδεση αυτή λέγεται **παράλληλη σύνδεση ως προς κάποια τάση** και τη χαρακτηρίζει η ισότητα των τάσεων. Θα μπορούσαμε, δηλαδή, τη σύνδεση αυτή, να τη λέμε και *ισοτασική*.



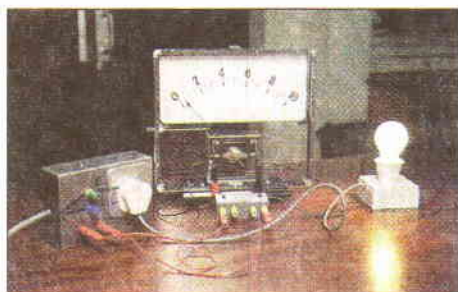
Το ηλεκτρικό κύκλωμα

Εφοδιασμένοι τώρα με όργανα που μπορούν να μας μετρούν ηλεκτρικά ρεύματα και διαφορές δυναμικού μπορούμε όχι μόνο να «αντικρίσουμε» συνολικά ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, αλλά και να το μελετήσουμε. Το πρώτο πράγμα που θα πρέπει να κάνουμε είναι να αναγνωρίσουμε ένα ένα τα διάφορα τμήματα (στοιχεία) που το αποτελούν. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε κάθε στοιχείο χωριστά, από σκοπιά ενεργειακή. Θα περιγράψουμε, δηλαδή, τη λειτουργία του στη γλώσσα της ενέργειας.

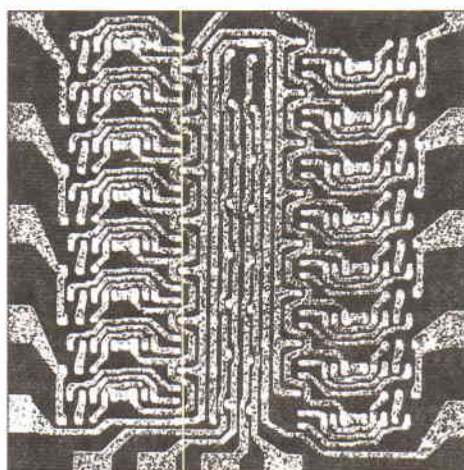


Ηλεκτρικό κύκλωμα τηλεόρασης

«Στοιχεια» ενός κυκλώματος. Αναγνώριση. Από τη στήλη του Alessandro Volta μέχρι τα ολοκληρωμένα κυκλώματα της σύγχρονης ηλεκτρονικής υπάρχει μία «απόσταση» δύο περίπου αιώνων, στη διάρκεια των οποίων η έννοια κύκλωμα γνώρισε μια οπωσδήποτε εντυπωσιακή εξέλιξη. Σήμερα, ο όρος *ηλεκτρικό κύκλωμα* αναφέρεται σε μια μεγάλη ποικιλία στοιχείων τα οποία συναρμολογούμενα το αποτελούν.



Ένα απλό κύκλωμα στο εργαστήριο



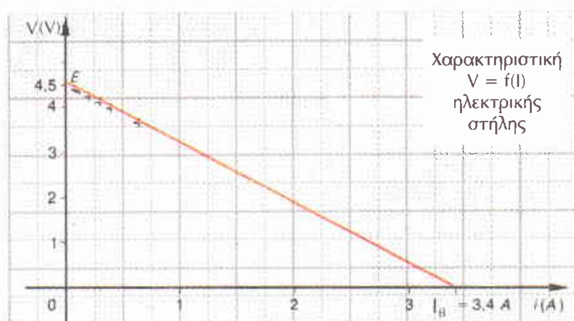
Τυπωμένο κύκλωμα ηλεκτρονικού υπολογιστή

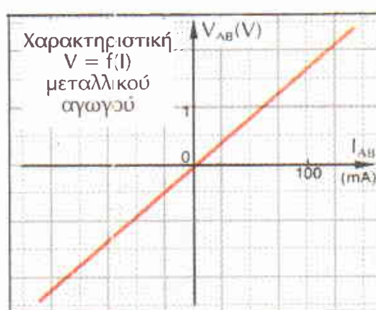
Ένα κύκλωμα μπορεί να περιέχει λαμπτήρα ,αντιστάτη, αγωγούς σύνδεσης, πυκνωτές, ηλεκτροκινητήρα, ροοστάτη, ηλεκτρολυτικές συσκευές, βολτάμετρα, δίοδες λυχνίες κενού, κρυσταλλοδίοδες, δίοδες Zener, thermistor, πηνίο, ηλεκτρική στήλη, γεννήτρια,

συσσωρευτή κι ένα σωρό άλλες διατάξεις με ονόματα που ίσως, δεν θα έχει κανείς συναντήσει ποτέ.

Δίπολα. Σ' αυτά, όμως, τα στοιχεία του κυκλώματος που αναφέραμε υπάρχει κάτι κοινό. Καθένα τους έχει δύο άκρα (ακροδέκτες, πόλους) στα οποία υπάρχει –γενικά– κάποια διαφορά δυναμικού. Αυτός είναι και ο λόγος που οι ηλεκτρονικοί τα λένε δίπολα.

Η χαρακτηριστική καμπύλη. Ένα δίπολο είναι δυνατόν να λειτουργεί με ποικίλες τιμές διαφοράς δυναμικού (τάσης) στα άκρα του.Η καμπύλη, η οποία απεικονίζει τη συνάρτηση τάσης –ρεύματος V = f(I), λέγεται χαρακτηριστική καμπύλη για κάθε δίπολο. Η μελέτη της μάς βοηθάει όχι μόνο να διακρίνουμε τα διάφορα δίπολα μεταξύ τους, αλλά και να προβλέψουμε τη λειτουργία καθενός από αυτά, όταν το παρεμβάλουμε σε κάποιο κύκλωμα.





Ηλεκτρική ενέργεια σε τμήμα κυκλώματος

Ας φανταστούμε, τώρα, ένα ρευματοφόρο κύκλωμα κι ένα τμήμα του το οποίο αποτελείται αποκλειστικά από δίπολα τροφοδοτούμενα. Θα μπορούσε για παράδειγμα να περιέχει ένα λαμπτήρα και ένα ηλεκτρικό μοτέρ. Όπως και κάθε δίπολο χωριστά, το τμήμα ενός κυκλώματος

α. έχει δύο άκρα (Α,Β), με τα οποία συνδέεται με το υπόλοιπο κύκλωμα. Ανάμεσά τους υπάρχει μια διαφορά δυναμικού (V_{AB}).

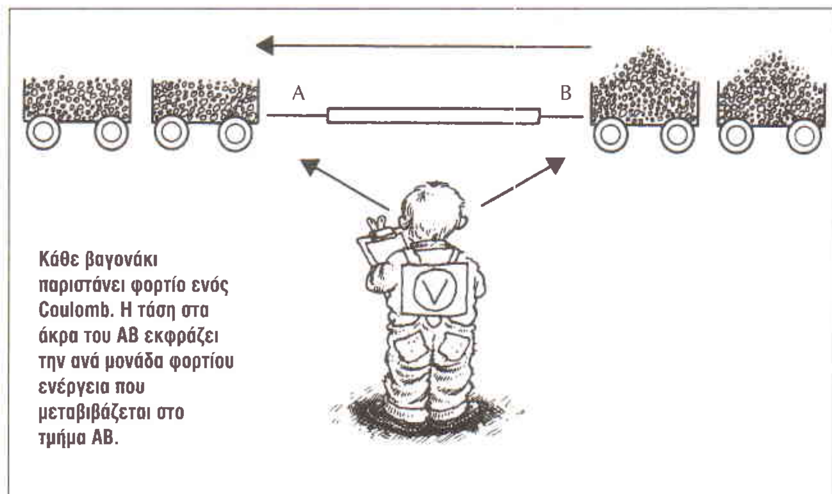
β. διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα I_{AB}.

γ. τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια.

Ακολουθώντας τη θεωρία μπορούμε να φτάσουμε σε μια εξίσωση, με την οποία η ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη ενέργεια

συσχετίζεται τόσο με το ρεύμα I_{AB} όσο και με τη διαφορά δυναμικού V_{AB}.

Ξεκινάμε από τον ορισμό της έννοιας *διαφορά δυναμικού*. Έχουμε ήδη πει ότι στο ηλεκτρικό πεδίο η μεταξύ δύο σημείων (A,B) διαφορά δυναμικού είναι εξ ορισμού ίση με το πηλίκο W_{AB}/q, όπου W_{AB} το έργο των δυνάμεων του πεδίου κατά τη μετακίνηση του φορτίου (q) από το ένα σημείο (A) στο άλλο (B). Αν τώρα το έργο W_{AB} αντικατασταθεί με τον όρο «μεταβιβαζόμενη –μέσω του πεδίου– ηλεκτρική ενέργεια» μπορούμε να καταλάβουμε γιατί η διαφορά δυναμικού (τάση) στα άκρα του τμήματος (A,B) θεωρείται ως η ανά μονάδα φορτίου ενέργεια που μεταβιβάζεται σ' αυτό.



Κάθε βαγονάκι παριστάνει φορτίο ενός Coulomb. Η τάση στα άκρα του AB εκφράζει την ανά μονάδα φορτίου ενέργεια που μεταβιβάζεται στο τμήμα AB.

Όταν λέμε, για παράδειγμα, ότι ανάμεσα σε δύο σημεία ρευματοφόρου κυκλώματος υπάρχει τάση 6 Volts, εννοούμε ότι στο τμήμα που οριοθετείται από τα σημεία αυτά, σε κάθε Coulomb μετακινούμενου ηλεκτρικού φορτίου μεταβιβάζεται ενέργεια 6 Joules. Η μεταβιβαζομένη, λοιπόν, σε ορισμένο χρόνο ενέργεια (W) σε κάθε τμήμα (AB) κυκλώματος θα είναι ίση με το γινόμενο $V_{AB} \cdot q$ της διαφοράς δυναμικού επί την ποσότητα φορτίου που μετακινήθηκε κατά το χρόνο αυτόν. Εφόσον το ρεύμα είναι συνεχές –σταθερό, για το τμήμα AB θα ισχύει $I_{AB} = q/t$, ή $q = I_{AB}t$ οπότε και $W = V_{AB}I_{AB}t$. Το πηλίκο, τέλος, της μεταβιβαζόμενης –σε χρόνο t– ενέργειας προς το χρόνο αυτό (t) αποτελεί την ισχύ (P). Θα είναι λοιπόν $\mathbf{P = V_{AB}I_{AB}}$. P(Watt) = V(Volt)xI (Ampère). Η εξίσωση

$$P = VI$$

μας δίνει* την ηλεκτρική ισχύ, που μεταβιβάζεται σ' ένα τμήμα κυκλώματος ανεξάρτητα από τη φύση των τροφοδοτούμενων διπόλων, που περιέχονται σ' αυτό.



Κατά τη λειτουργία, λοιπόν, ενός διπόλου από το ζευγάρι τάση – ρεύμα μπορούμε να υπολογίσουμε και τη μεταβιβαζόμενη ηλεκτρική ισχύ. Μπορούμε, επίσης, από τις τιμές ισχύος και τάσης για τη λειτουργία μιας συσκευής να προσδιορίσουμε το ρεύμα λειτουργίας της. Ένας θερμοσίφωνας 4000W όταν λειτουργεί υπό τάση** 220V θα διαρρέεται από ρεύμα I = 4000/220 V = 18,18 A.

Ηλεκτρικό ρεύμα (I)	Ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα χρόνου	$I = \frac{q}{t}$
Ηλεκτρική τάση (V)	Μεταβιβαζόμενη ενέργεια ανά μονάδα φορτίου	$V = \frac{W}{q}$
Ηλεκτρική ισχύς (P)	Μεταβιβαζομένη ενέργεια ανά μονάδα χρόνου	$P = \frac{W}{t}$

Στον πίνακα μπορεί κανείς να διακρίνει ότι ξεκινώντας από τρία μεγέθη, φορτίο, χρόνο, ενέργεια και παίρνοντας κάθε φορά δύο από αυτά χτίζουμε τρία άλλα μεγέθη, την ένταση ρεύματος, την τάση και την ισχύ. Από κει και πέρα η εξίσωση P = VI έρχεται ως συνέπεια των τριών ορισμών.

** Υπολογίσαμε τη μέση ισχύ P = W/t για την περίπτωση σταθερής τάσης και σταθερού ρεύματος. Αποδεικνύεται ότι η ίδια εξίσωση P = VI ισχύει για τη (στιγμιαία) μεταβιβαζόμενη ισχύ σε κάθε περίπτωση.*

*** Οι οικιακές συσκευές τροφοδοτούνται με ρεύμα εναλλασσόμενο. Ειδικά για τις θερμαντικές συσκευές, μια σχέση της μορφής P = VI μας δίνει τη μέση ηλεκτρική ισχύ εφόσον, όμως, ως V και I χρησιμοποιηθούν αντίστοιχα οι έννοιες ενεργός τάση και ενεργός ένταση, τις οποίες θα συναντήσουμε στο κεφάλαιο για τα εναλλασσόμενα ρεύματα.*

Αντιστάτες



Ηλεκτρική αντίσταση

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε τρεις αγωγούς, ότι σε καθέναν από αυτούς εφαρμόζουμε την ίδια τάση και ότι τα αντίστοιχα ρεύματα είναι I_1 = 400mA, I_2 = 8mA και I_3 = 1mA. Το συμπέρασμα είναι ότι ο πρώτος παρουσιάζει καλύτερη αγωγιμότητα από τους άλλους δύο ενώ ο τρίτος «αντιστέκεται» περισσότερο και από τους τρεις στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Φαίνεται λογικό επίσης να δεχθούμε ότι ο τρίτος αγωγός εμφανίζει οκτώ φορές μεγαλύτερη αντίσταση από τον δεύτερο και τετρακόσιες φορές μεγαλύτερη αντίσταση από τον πρώτο.

Οι φυσικοί αποδεχόμενοι αυτή τη λογική προτείνουν ένα μονόμετρο μέγεθος, το οποίο να «βαθμολογεί» τις αντιστάσεις –η αντίστροφα τις αγωγιμότητες– των διαφόρων αγωγών στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Το μέγεθος λέγεται **ηλεκτρική αντίσταση αγωγού** και ορίζεται ως **πηλίκο της τάσης (V) που εμφαρμόζεται στα άκρα του, προς την ένταση (I) του ρεύματος που τον διαρρέει.** Για το συμβολισμό του μεγέθους χρησιμοποιείται διεθνώς το γράμμα R, αρχικό της λέξης Resistance.

$$R = \frac{V}{I}$$ **εξίσωση ορισμού της ηλεκτρικής αντίστασης**

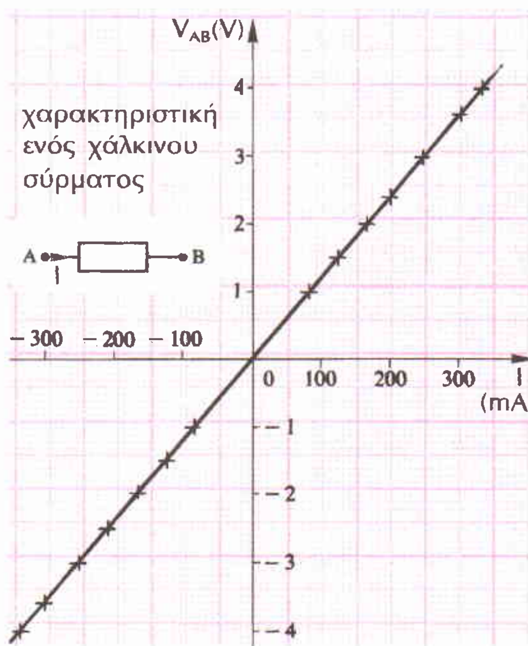
Στο Διεθνές Σύστημα, μονάδα μετρήσεως της αντίστασης είναι το 1 Ohm (Ωμ). Συμβολίζεται με 1Ω. Ισχύει 1Ω = 1V/1A. Αυτό σημαίνει ότι ένας αγωγός εμφανίζει ανάμεσα σε δύο σημεία του αντίσταση 1 Ohm, εφόσον, κατά την εφαρμογή στα σημεία αυτά τάσης 1 Volt, ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα 1 Ampére.

Το αντίστροφο της ηλεκτρικής αντίστασης λέγεται ηλεκτρική αγωγιμότητα (G).

Το πρώτο ερώτημα είναι: *Από τι εξαρτάται η αντίσταση ενός συγκεκριμένου αγωγού;* Επηρεάζεται άραγε από τη διαφορά δυναμικού που θα εφαρμόσουμε; Αν θέλουμε απάντηση στο πρώτο αυτό ερώτημα δεν έχουμε άλλη επιλογή από το να προσφύγουμε στην «ετυμηγορία» του εργαστηρίου, εφοδιασμένοι, βέβαια, με βολτόμετρο (ή παλμογράφο) και αμπερόμετρο. Χρειαζόμαστε ακόμα μια διάταξη που να μας δίνει ποικιλία τιμών τάσης. Μια κατάλληλη τέτοια διάταξη είναι το ποτενσιόμετρο.

1. Ο αγωγός – δίπολο (ΑΒ) είναι ένα κομμάτι σύρμα χάλκινο. Εφόσον δεν διαρρέεται από ρεύμα, η τάση στα άκρα του είναι μηδέν. Εφαρμόζουμε τάση 1 Volt και το αμπερόμετρο μάς δείχνει 83 mA. Συνεχίζουμε μ' αυτόν τον τρόπο και καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα. Αντιστρέφουμε την τάση, οπότε αντιστρέφεται και το ρεύμα. Συμπληρώνουμε τον πίνακα με τα αποτελέσματα των νέων μετρήσεων. Μπορούμε για την τάση και το ρεύμα να χρησιμοποιήσουμε τώρα αρνητικές τιμές.

V_{AB} (V)	0	1	1,5	2	2,4	3	3,6	4	–1	–1,5	–2	–2,4
I_{AB} (mA)	0	83	125	167	200	250	300	333	–83	–125	–167	–200
R (Ω)		12,05	12	11,97	12	12	12	12,01	12,05	12	11,97	12



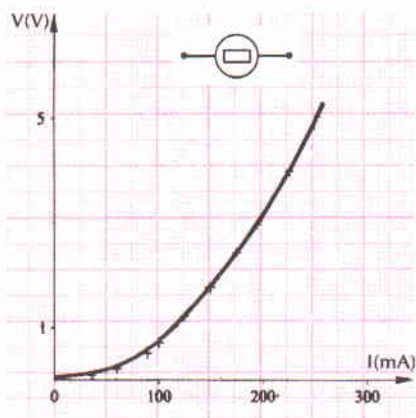
Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων φροντίζουμε να διατηρούμε για το ρεύμα τέτοιες τιμές ώστε η θερμοκρασία του σύρματος να παρουσιάζει ασήμαντες μεταβολές. Αυτό το κάνουμε για να απομονώσουμε μια πιθανή εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία.

Κάνουμε τη γραφική παράσταση τάσης – έντασης. Είναι η χαρακτηριστική του διπόλου που μελετήσαμε. Βλέπουμε ότι είναι ευθεία γραμμή. Τα συμπεράσματα τώρα. Τα όργανα των μετρήσεων έδειξαν ότι η αντίσταση του σύρματος είναι ανεξάρτητη από την τιμή και την πολικότητα της τάσης που εφαρμόζουμε. Μ' άλλα λόγια η ένταση του ρεύματος εμφανίζεται ανάλογη προς την εφαρμοζόμενη διαφορά δυναμικού.

2. Επαναλαμβάνουμε το πείραμα με σιδερένιο σύρμα και ύστερα πάλι με σύρμα από κράμα χαλκού–νικελίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και στους αγωγούς αυτούς εμφανίζεται η ανεξαρτησία της αντίστασης από την τιμή της τάσης.

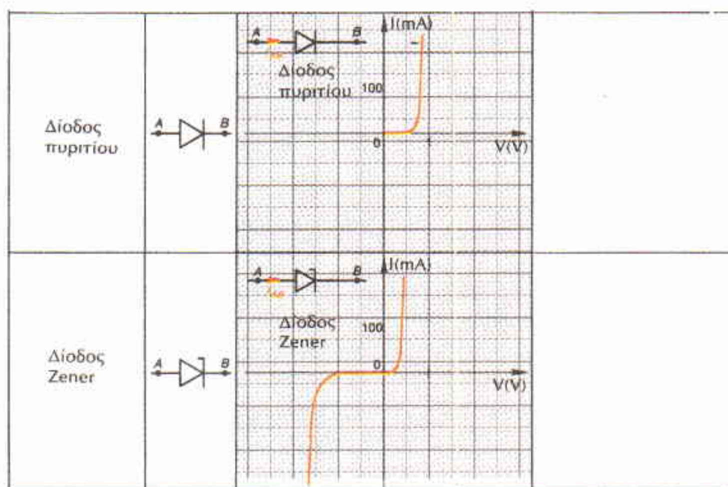
3. Δοκιμάζουμε τώρα με λαμπτήρα πυρακτώσεως. Η διαφορά από τα προηγούμενα πειράματα έγκειται στο γεγονός ότι στο αγώγιμο κομμάτι του λαμπτήρα θα εκδηλωθεί μεγάλη θερμοκρασιακή αύξηση. Καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα. Σχεδιάζουμε και τη χαρακτηριστική του λαμπτήρα.

V_{AB} (V)	0	0,1	0,2	0,5	0,8	1,5	2	2,5	4	6
I_{AB} (mA)	0	36	61	81	100	132	155	175	227	285
R (Ω)		2,8	3,3	6,2	8	11,4	12,9	14,2	17,6	21



Το συμπέρασμα είναι ότι στην περίπτωση του λαμπτήρα η αντίσταση δεν παραμένει σταθερή. Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει την τιμή της σημαντικά.

4. Παίρνουμε ανάλογες μετρήσεις χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές διόδους διαφόρων τύπων. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες που προκύπτουν είναι εύγλωττες. Μας λένε ότι το ρεύμα δεν είναι ανάλογο προς την τάση ή ότι η αντίσταση τους –το πηλίκο V/I– δεν είναι ανεξάρτητη από την τάση την οποία εκάστοτε εφαρμόζουμε.



Ο νόμος του Ohm

Οι μετρήσεις μας οδηγούν σε συμπεράσματα τα οποία μπορούμε να γενικεύσουμε. **Η αντίσταση ενός μεταλλικού αγωγού –σταθερής θερμοκρασίας– είναι ανεξάρτητη από την τάση που εφαρμόζουμε. R = V/I = σταθερό.** Το συμπέρασμα αποτελεί το λεγόμενο **νόμο του Ohm** για τους μεταλλικούς αγωγούς. Μπορούμε να το διατυπώσουμε και διαφορετικά.



Εφόσον η θερμοκρασία ενός μεταλλικού αγωγού διατηρείται σταθερή, η ένταση του ρεύματος (I) που τον διαρρέει είναι ανάλογη προς τη διαφορά δυναμικού (V) η οποία εφαρμόζεται στα άκρα του. Γράφουμε:

$$I = \frac{1}{R} V \qquad \text{με } R = \text{σταθερό}$$

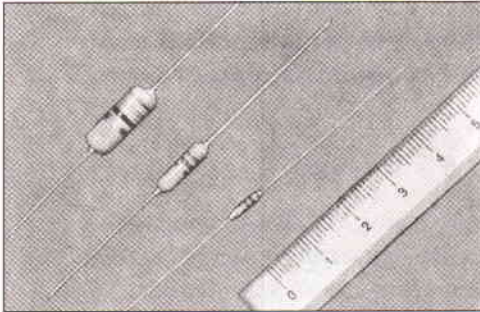
Ο νόμος του Ohm δεν είναι γενικός νόμος για όλους τους αγωγούς. Οι λυχνίες κενού, για παράδειγμα, δεν πειθαρχούν σ' αυτόν. Η αντίστασή τους εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζουμε. Το ίδιο ισχύει και για πολλούς άλλους αγωγούς, τους οποίους χρησιμοποιεί η ηλεκτρονική σήμερα. Οι κρυσταλλικοί ανορθωτές, τα transistors, τα thermistors, αποτελούν ορισμένα μόνο από τα παραδείγματα «ανυπακοής». Η σύγχρονη ηλεκτρονική και σε κάποιο βαθμό και ο χαρακτήρας του σύγχρονου «ηλεκτρονικού» πολιτισμού σχετίζεται με την απείθεια που δείχνουν στο νόμο Ohm όλοι αυτοί οι αγωγοί. Ας σημειωθεί εδώ ότι η εξίσωση ορισμού της αντίστασης (R = V/I) δεν συμπίπτει με το νόμο του Ohm. Ισχυει ακόμα και για τους **«ανυπάκοους» προς το νόμο αγωγούς.**

Η αντίσταση του νήματος ενός λαμπτήρα 100 W/220 V, είναι 484 Ω. Το σύρμα από το καλώδιο μιας λάμπας έχει αντίσταση μικρότερη και από 1 Ω, ενώ η αντίσταση του ανθρώπινου σώματος μπορεί να κυμανθεί από 100 Ω, μέχρι 500.000 Ω, ανάλογα με τις περιστάσεις.

Πτώση τάσεως. Σε κάθε τμήμα κυκλώματος, το γινόμενο του ρεύματος (I) επί την ωμική αντίσταση (R) που παρουσιάζει το τμήμα αυτό, λέγεται πτώση τάσεως. Αν το τμήμα κυκλώματος υπακούει στον νόμο του Ohm, το γινόμενο αυτό είναι ίσο με τη διαφορά δυναμικού (V) που υπάρχει στα άκρα του τμήματος. Η ισότητα $V = I \cdot R$ δεν ισχύει πάντοτε. Στην περίπτωση, για παράδειγμα, που στο τμήμα κυκλώματος υπάρχει ένας κινητήρας, η διαφορά δυναμικού στα άκρα του είναι μεγαλύτερη από την πτώση τάσεως.

Αντιστάτες. Οι αγωγοί που πειθαρχούν στο νόμο του Ohm λέγονται ***αντιστάτες*** (αντιστάσεις ή ωμικές αντιστάσεις). Ένα κομμάτι σύρμα είναι ο πιο απλός αντιστάτης. Αν ποτέ χρειαστούμε αντιστάτες με ορισμένη αντίσταση πρέπει να τις αναζητήσουμε σε μαγαζιά που πουλάνε ηλεκτρονικά. Ορισμένοι απ' αυτούς είναι μεταλλικοί αγωγοί μέσα σε μικρούς κεραμικούς σωλήνες κι έχουν εξωτερικά χρωματιστές λωρίδες φτιαγμένες από σμάλτο.

Από τα χρώματα, μάλιστα, μπορεί κανείς –εφόσον ξέρει τον κώδικα– να κάνει ανάγνωση της τιμής της αντίστασης σε Ωμ. Να μεταφράζει, δηλαδή, από χρώματα σε αριθμούς. Υπάρχουν ακόμα αντιστάσεις από κατάλληλα μίγματα σε μεγάλη ποικιλία τιμών αντίστασης. Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα χρησιμοποιούνται αντιστάτες από πολύ λεπτά αγώγιμα φιλμ.


Ωμικοί αγωγοί άνθακα

Ας προσέξουμε και τη διαφορά ανάμεσα στους όρους *αντιστάτης* και *αντίσταση*. Ο αντιστάτης είναι ο αγωγός ενώ η αντίσταση είναι το μέγεθος. Κάτι ανάλογο συναντήσαμε και με τους όρους *πυκνωτής* και *χωρητικότητα*.

Από τι εξαρτάται η αντίσταση;

Ένα από τα προηγούμενα πειράματα έδειξε ότι η αντίσταση ενός συγκεκριμένου αγωγού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του. Υπάρχει βέβαια ακόμα το ερώτημα. *Ποια στοιχεία επηρεάζουν την τιμή της αντίστασης ενός ωμικού αγωγού;* Στην αντίστοιχη ερώτηση για τη χωρητικότητα του πυκνωτή απαντήσαμε ότι η τιμή της διαμορφώνεται από τα γεωμετρικά στοιχεία και το παρεμβαλλόμενο διηλεκτρικό. Στην τωρινή περίπτωση της αντίστασης, οι πειραματικές μετρήσεις μάς δείχνουν ότι η αντίσταση εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του αγωγού και το υλικό του. Ειδικά για κυλινδρικούς ή πρισματικούς αγωγούς σταθερής διατομής, τα πειραματικά μηνύματα μας λένε ότι η αντίσταση

α) είναι ανάλογη προς το μήκος (ℓ) του αγωγού,

β) είναι αντίστροφα ανάλογη προς το εμβαδόν (S) της διατομής του,

γ) εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αγωγού.

Η σχέση

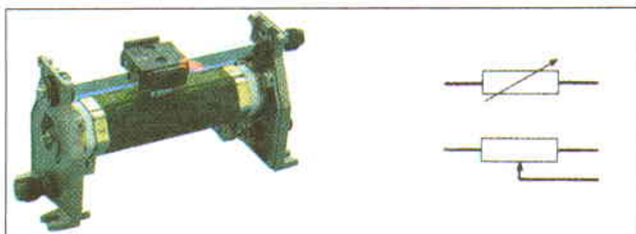
$$R = \rho \frac{\ell}{S}$$

Ειδική αντίσταση (ρ) μερικών υλικών	
Υλικό	Ειδική αντίσταση (ρ) σε Ωm στους 20°C.
Μέταλλα	
Άργυρος	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Χαλκός	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Αργίλιο	$2,8 \cdot 10^{-8}$
Σίδηρος	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Υδράργυρος	$96 \cdot 10^{-8}$
Κράματα	
Κονσταντάνη (Cu, Ni)	$50 \cdot 10^{-8}$
Χρωμονικελίνη (Ni, Fe, Cr, Mn))	$100 \cdot 10^{-8}$
Μαγγανίνη (Cu, Mn, Ni)	$42 \cdot 10^{-8}$
Ημιαγωγοί	
Πυρίτιο	~1000
Γερμάνιο	~0,5
Διηλεκτρικά	
Κεραμικό	10^{10} ως 10^{23}
Γυαλί	10^{12} ως 10^{15}
Ξύλο	10^{8} ως 10^{12}
Ανθρώπινο σώμα	
Αίμα	1,5
Πνεύμονας	20
Λίπος	25
Σκελετός	5

εκφράζει συνολικά την απάντηση. Ο συντελεστής, που συμβολίζεται με το γράμμα ρ, λέγεται **ειδική αντίσταση του υλικού** και μετριέται σε Ω·m. Ενώ η αντίσταση αναφέρεται σε αγωγό, η ειδική αντίσταση αναφέρεται στο υλικό του αγωγού. Λέμε, για παράδειγμα, η αντίσταση του νήματος του λαμπτήρα, ενώ λέμε η ειδική αντίσταση του βολφραμίου.

Με κριτήριο την τιμή της ειδικής αντίστασης μπορούμε να κατατάξουμε τα υλικά σε σχέση με την αγωγιμότητά τους. Στο σχετικό πίνακα με τις τιμές των ειδικών αντιστάσεων, είναι αξιοσημείωτη η παρουσία σωμάτων, όπως το ξύλο και το γυαλί, τα οποία τα είχαμε κατατά-

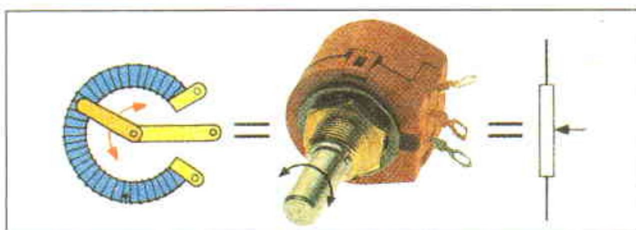
ξει στους μονωτές. Είναι αυτό που είχαμε πει στο πρώτο κεφάλαιο ότι, δηλαδή, η διαίρεση σε αγωγούς και μονωτές είναι «χονδροειδής». Όλα τα υλικά έχουν πεπερασμένη, μικρή ή μεγάλη, ειδική αντίσταση.

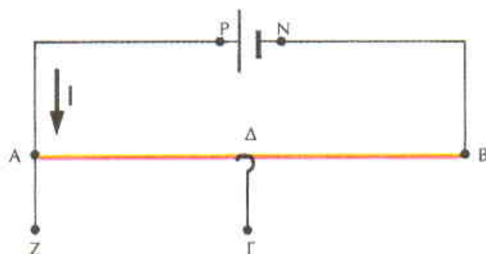


Ρυθμιστική αντίσταση

Η αντίσταση ενός ομογενούς κυλινδρικού αγωγού είναι ανάλογη προς το μήκος του. Πάνω σ' αυτήν την αναλογία βασίζεται η λειτουργία της ρυθμιστικής αντίστασης, του οργάνου δηλαδή που μας επιτρέπει να «ρυθμίζουμε» είτε το ρεύμα του κυκλώματος είτε την τάση στα άκρα ενός διπόλου. Ανάλογα με τον τρόπο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα το όργανο αυτό, θα λειτουργεί είτε ως ρυθμιστής της τάσης, οπότε και θα λέγεται **ποτενσιόμετρο** είτε ως ρυθμιστής του ρεύματος, οπότε θα λέγεται **ροοστάτης.**

Έχουμε πει ότι ένα από τα «κουμπιά» του ραδιοφώνου συνδέεται με μεταβλητό πυκνωτή. Ένα άλλο «κουμπί», αυτό με το οποίο «δυναμώνουμε τη φωνή», αποτελεί τμήμα ενός ποτενσιομέτρου. Ποτενσιόμετρο τέτοιου τύπου παρουσιάζεται παρακάτω σε σχηματική παράσταση, σε φωτογραφία και με συμβολισμό.





Ποτενσιόμετρο. Τα άκρα του ομογενούς κυλινδρικού σύρματος (ΑΒ) συνδέονται αγώγιμα με τους πόλους της πηγής (σχήμα). Οι αγωγοί σύνδεσης έχουν αμελητέα αντίσταση γι' αυτό και $V_{AB} = V_{PN} = V$. Το άκρο Α συνδέεται με τον ένα ακροδέκτη του διπόλου στο οποίο θέλουμε να εφαρμόσουμε τη ρυθμιζόμενη τάση. Το άλλο άκρο του διπόλου συνδέεται με το κυλινδρικό σύρμα μέσω του αγωγού ΓΔ το άκρο Δ του οποίου βρίσκεται πάντα σε επαφή με το κυλινδρικό σύρμα και μπορεί να μετατοπίζεται πάνω του.

Η κινητή αυτή «επαφή» Δ ονομάζεται δρομέας. Υποθέτουμε ότι το κύκλωμα ΑΔΓΖ είναι ανοικτό* και ότι το ΑΡΝΒ είναι κλειστό. Αν εφαρμόσουμε το νόμο Ohm

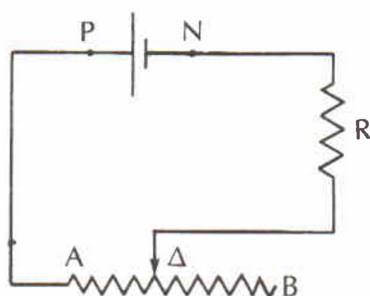
α) για το δίπολο ΑΒ, θα έχουμε $V_{AB} = I \cdot R_{AB}$

β) για το δίπολο ΑΔ, θα έχουμε $V_{A\Delta} = I \cdot R_{A\Delta}$

$$\text{οπότε } V_{A\Delta} = V_{AB}\,\frac{R_{A\Delta}}{R_{AB}}. \text{ Αλλά } \frac{R_{A\Delta}}{R_{AB}} = \frac{x}{\ell} \text{ οπότε } \mathbf{V_{A\Delta} = V_{PN}\,\frac{x}{\ell}}.$$

όπου $x = A\Delta$ και $\ell = AB$.

Η τελευταία σχέση μας λέει ότι με μετακίνηση του δρομέα θα μπορούμε να παίρνουμε διάφορες τιμές τάσης μεταξύ των τιμών μηδέν και V_{PN}. *Το δίπολο ΑΔ ισοδυναμεί, συνεπώς, με πηγή ρυθμιζόμενης τάσης.*



Ροοστάτης. Αν συνδέσουμε τον έναν πόλο της πηγής με το άκρο του ομογενούς κυλινδρικού σύρματος και τον άλλο πόλο με τον δρομέα, παρεμβάλλοντας σε σειρά το δίπολο το οποίο θέλουμε να τροφοδοτούμε με ρυθμιζόμενο ρεύμα, η ρυθμιστική αντίσταση θα λειτουργεί ως ροοστάτης. Πρόκειται, όπως καταλαβαίνουμε, για σύνδεση χωρίς διακλάδωση. Είναι φανερό ότι η μετακίνηση του δρομέα θα έχει ως συνέπεια τη μεταβολή της αντίστασης του κυκλώματος άρα και του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα.



Κάθε αυτοκινητάκι έχει ένα μικρό ηλεκτρικό κινητήρα. Ένας ροοστάτης ρυθμίζει το ρεύμα τροφοδοσίας του κινητήρα με αποτέλεσμα να ρυθμίζει και την ταχύτητα του μικρού αυτοκινήτου.

Αντιστάτης και ηλεκτρική ενέργεια

Ξαναρχόμαστε τώρα στον αντιστάτη για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του από τη σκοπιά της ενέργειας. Δύο είναι τα σημα-

---

** Όταν το κύκλωμα ΑΔΓΖ είναι κλειστό, τα τμήματα του κυλινδρικού σύρματος δε διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα και το πρόβλημα γίνεται κάπως πιο σύνθετο.*

ντικότερα γεγονότα που συμβαίνουν στον μικρόκοσμο ενός αντιστάτη όταν τον ρευματοδοτήσουμε.

- Το ένα είναι η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και
- το άλλο η αλληλεπίδραση των κινουμένων ηλεκτρονίων με τα ιόντα του αγωγού την οποία μπορούμε να φανταζόμαστε σαν σύγκρουση.

Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στα ηλεκτρόνια το έργο των οποίων μετράει τη μεταβιβαζόμενη ενέργεια. Από την άλλη, οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα ιόντα φρενάρουν τα ηλεκτρόνια, γεγονός που μας επιτρέπει να θεωρούμε ότι κινούνται με σταθερή ρευματική ταχύτητα. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και κατά την πτώση του αλεξιπτωτιστή ο οποίος ενεργοποιείται από το πεδίο βαρύτητας, εξαιτίας, όμως, της αντίστασης του αέρα, πέφτει τελικά με σταθερή ταχύτητα.

Σταθερή, όμως, ταχύτητα σημαίνει και σταθερή κινητική ενέργεια. Η πρόσθετη κινητική ενέργεια που αποκτούν τα ηλεκτρόνια ανάμεσα σε δύο διαδοχικές συγκρούσεις ανακατανέμεται ανάμεσα σ' αυτά και τα ιόντα του αγωγού με συνέπεια η μέση κινητική ενέργεια της ταλάντωσης των ιόντων να αυξάνεται. **Έχουμε δηλαδή υποβάθμιση της οργανωμένης ενέργειας που παίρνουν τα ηλεκτρόνια (από το πεδίο) σε ανοργάνωτη θερμική ενέργεια. Το γεγονός εκδηλώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του αγωγού.**

Ας συνδυάσουμε τώρα τα δύο ιδιαίτερα γνωρίσματα του αντιστάτη στα οποία έχουμε ήδη αναφερθεί:

α) Υπακούει στο νόμο του Ohm. Η αντίσταση του (R) είναι ανεξάρτητη του ρεύματος (I) και της τάσης (V). Για σταθερή θερμοκρασία ισχύει $R = V/I$ ή $\mathbf{V = IR}$.

β) Μετατρέπει τη μεταβιβαζόμενη σ' αυτόν ενέργεια εξ ολοκλήρου σε ενέργεια θερμική. Πρόκειται για πλήρη ενεργειακή υποβάθμιση γι' αυτό χρησιμοποιούμε τη φράση «*Ο αντιστάτης καταναλώνει τη μεταβιβαζόμενη σ' αυτόν ενέργεια*».

Θυμίζουμε ότι η ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη στον αντιστάτη ενέργεια (ισχύς) δίνεται από την εξίσωση $\mathbf{P = VI}$

Αν συνδυάσουμε τις δύο αυτές ιδιαιτερότητες και τις αντίστοιχες εξισώσεις θα προκύψει η εξίσωση **για την ανα μονάδα χρόνου ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνει ένα αντιστάτης.**

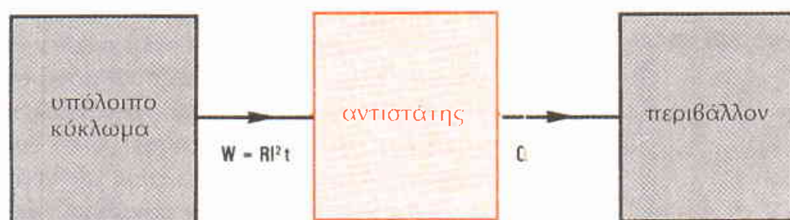
$$\mathbf{P = I^2R}$$

Σημείωση. Αν στην εξίσωση $P = VI$ αντικαταστήσουμε το I με το ίσο του (σύμφωνα με τον νόμο του Ohm) θα προκύψει η επίσης εν-

διαφέρουσα εξίσωση **$P = V^2/R$** για την ισχύ που καταναλώνει ένας αντιστάτης.

Η «αυστηρή» γλώσσα της θερμοδυναμικής. Το ηλεκτρικό πεδίο που εγκαθίσταται στο εσωτερικό του ρευματοφόρου αγωγού ασκεί, όπως είπαμε, δυνάμεις στα ηλεκτρόνια. Το έργο αυτών των δυνάμεων είναι –για την περίπτωση σταθερού ρεύματος– ίσο με $W = Pt = I^2 Rt$ και αποτελεί την ποσότητα μεταβιβαζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ας προσέξουμε ότι **η ενέργεια αυτή δεν αποθηκεύεται στον αγωγό όπως η ενέργεια σ' έναν πυκνωτή, αλλά απλά μεταβιβάζεται από το πεδίο στον αγωγό** μέσω έργου. Στη γλώσσα, δηλαδή, της θερμοδυναμικής αποτελεί ένα έργο.

Οι συνέπειες αυτής της μεταβίβασης είναι να αυξηθεί η εσωτερική θερμική ενέργεια* του αγωγού και το γεγονός εκδηλώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μεταβιβάζει ο αγωγός θερμότητα στο περιβάλλον του. Στη συνήθη περίπτωση όπου η θερμοκρασία του αγωγού παραμένει σταθερή **η μεταβιβαζόμενη στον αγωγό ενέργεια (υπό μορφή ηλεκτρικού έργου) είναι ίση με τη θερμότητα την οποία ο αγωγός μεταβιβάζει στο περιβάλλον του.**



Joule. Ο δρόμος του πειράματος. Κατά τις αρχές της δεκαετίας του 1840, ο James Prescott Joule ακολουθώντας, όπως έκανε πάντα, το δρόμο του πειράματος κατέληξε σε συμπεράσματα παρόμοια με αυτά που περιέχονται στην εξίσωση **$P = I^2R$.** Εμπιστευόμενος τις συσκευές του και τις μετρήσεις του απέδειξε ότι:

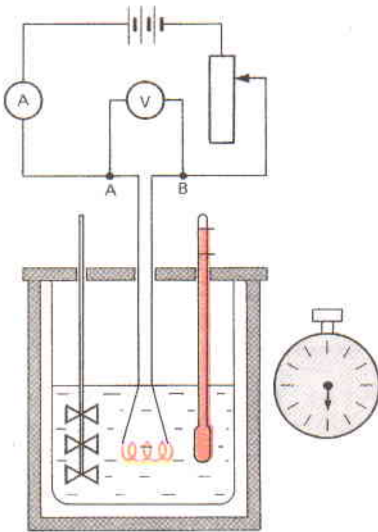
Κατά τη ρευματοδότηση ενός αντιστάτη και εφόσον η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, το ανά μονάδα χρόνου ποσό θερμότητας που εκχωρεί στο περιβάλλον του είναι α) ανάλογο προς το

** Χρειάζεται, ίσως, να θυμίσουμε τη διαφορά ανάμεσα στους όρους θερμική ενέργεια και θερμότητα. Με τον όρο θερμική ενέργεια εκφράζουμε το μέρος εκείνο της εσωτερικής ενέργειας, οι μεταβολές του οποίου αντανακλώνται στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Μπορούμε συνεπώς να λέμε ότι αυξήθηκε ή ελαττώθηκε η θερμική ενέργεια ενός συστήματος. Αντίθετα, ο όρος θερμότητα έχει νόημα μόνο ως ενέργεια μεταβιβαζόμενη από το σύστημα προς το περιβάλλον του ή αντίστροφα.*

τετράγωνο του ρεύματος, εφόσον οι μετρήσεις γίνονται με την ίδια αντίσταση και β) ανάλογο προς την αντίσταση, εφόσον οι μετρήσεις γίνονται με το ίδιο ρεύμα.

Τα συμπεράσματα αυτά, συνιστούν τον λεγόμενο **νόμο του Joule,** ο οποίος είναι, στην ουσία, ένας ακόμα τρόπος για να περιγράψουμε τη διατήρηση της ενέργειας στην ειδική περίπτωση της μετατροπής μεταβιβαζόμενης ενέργειας σε ενέργεια θερμική.

Ο νόμος του Joule αποτελεί «νόμο» κατά την ίδια έννοια που αποτελεί και ο νόμος του Ohm. Αναφέρεται και αυτός σε ορισμένα μόνο υλικά και δεν συνιστά ένα γενικό νόμο της φύσης. Εξάλλου, κάθε υλικό που πειθαρχεί στο νόμο του Joule πειθαρχεί και στον νόμο του Ohm.



Η πειραματική επαλήθεση του νόμου, βασίζεται πάνω σε μετρήσεις της θερμότητας που εκχωρεί ο ρευματοφόρος αγωγός προς το περιβάλλον του.

Τέτοιου είδους μετρήσεις μπορούμε να κάνουμε και με όργανα που διαθέτει το σχολικό εργαστήριο.

Φαινόμενο Joule. Το φαινόμενο κατά το οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί αύξηση της θερμοκρασίας των αγωγών έχει επικρατήσει να λέγεται *φαινόμενο Joule.* Δεν εμφανίζεται μόνο στους αντιστάτες. Εμφανίζεται και στους αγωγούς των ηλεκτροκινητήρων αλλά και στο εσωτερικό των ηλεκτρικών πηγών. Ειδικά, όμως, για τους αντιστάτες το φαινόμενο Joule αποτελεί τον μοναδικό ενεργειακό μετασχηματισμό που συμβαίνει σ' αυτούς όταν διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα.



Λαμπτήρας του 1910 με νήμα από βολφράμιο

Εφαρμογές του φαινομένου Joule

Ο λαμπτήρας πυρακτώσεως αποτελείται από γυάλινο περίβλημα, μέσα στο οποίο υπάρχει μεταλλικό νήμα τυλιγμένο σε σπείρωμα. Το νήμα είναι πολύ λεπτό κι έχει μήκος που μπορεί να φθάνει και το ένα μέτρο. Όταν ρευματοδοτηθεί φθάνει σε θερμοκρασία ισορροπίας 2700°C με 3000°C στην οποία εκπέμπει το γνωστό φως.

Ο πρώτος ηλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως κατασκευάστηκε κατά τη δεκαετία του 1870 από τον Thomas


Λαμπτήρας που κατασκευάστηκε το 1879 από τον Edison


Σύγχρονος λαμπτήρας μεγάλης ισχύος (5 KW) που χρησιμοποιείται σε κινηματογραφικές λήψεις. Το νήμα του είναι από βολφράμιο.

Edison. Τα προβλήματα που χρειάστηκε να αντιμετωπίσει για να προχωρήσει από την αρχική κατασκευή στην παραπέρα βελτίωση ήταν πολλά και ορισμένα από αυτά, όπως η τήξη του μεταλλικού νήματος και η οξείδωσή του, εμφανίζονταν αξεπέραστα. Εξυπακούεται ότι για την τεχνολογία της εποχής μας τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται εύκολα. Η τήξη του νήματος αποφεύγεται με τη χρησιμοποίηση δύστηκτου μετάλλου, όπως είναι το βολφράμιο που έχει σημείο τήξης 3650°C. Η οξείδωση του μετάλλου αντιμετωπίζεται με το να μην υπάρχει μέσα στο δοχείο αέρας αλλά ένα αδρανές αέριο όπως είναι το αργό, το κρυπτό ή το άζωτο. Στο μεταξύ η παρουσία του αερίου είναι αναγκαία, γιατί εμποδίζει την εξαέρωση που θα υφίστατο το μέταλλο, εάν μέσα στο γυάλινο περίβλημα υπήρχε απόλυτο κενό.

Είναι γνωστό ότι το φαινόμενο Joule δεν αξιοποιείται μόνο με τους λαμπτήρες φωτισμού. Η ηλεκτρική κουζίνα και το ηλεκτρικό σίδερο αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα οικιακών συσκευών, στις οποίες βρίσκει εφαρμογή το ίδιο φαινόμενο. Το ίδιο συμβαίνει και με τον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα.

Σε κάθε θερμαντική συσκευή αναγράφονται δύο ενδείξεις. Είναι τα λεγόμενα *ονομαστικά στοιχεία* της. Το ένα από αυτά αναφέρεται στην τάση (V_0) της κανονικής λειτουργίας της και το άλλο στην ηλεκτρική ισχύ (P_0) που θα καταναλώνει εφόσον θα λειτουργεί με την ονομαστική τάση V_0. Αν η συσκευή λειτουργήσει με τάση μικρότερη από την ονομαστική αποδίδει ισχύ μικρότερη από την P_0, πράγμα ασύμφορο. Αν πάλι λειτουργεί με τάση μεγαλύτερη από την ονομαστική, αποδίδει ισχύ μεγαλύτερη από την P_0, αλλά μειώνεται σημαντικά η διάρκεια της ζωής της ή καταστρέφεται.

Τα δύο ονομαστικά στοιχεία σχετίζονται με την αντίσταση (R) του αντιστάτη σύμφωνα με την εξίσωση $P_0 = V_0^2/R$. Μπορούμε, συνεπώς, από τα δύο αυτά στοιχεία να υπολογίζουμε την αντίσταση. Για ένα θερμοσίφωνα 220V/2000W, η αντίσταση θα είναι $R = V_0^2/P_0$, θα είναι δηλαδή 24,2 Ω.

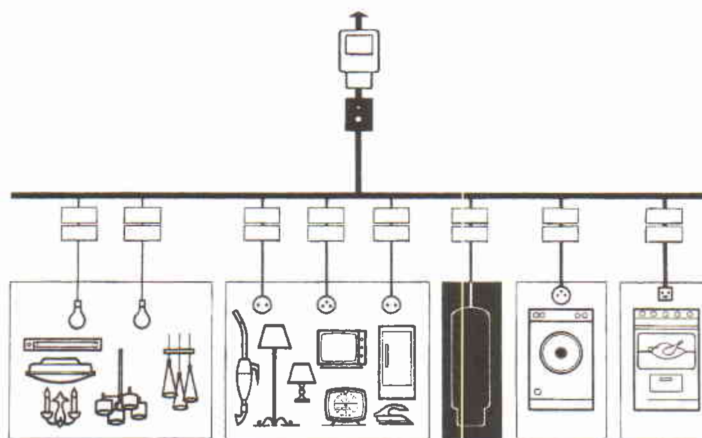
Στις οικιακές εγκαταστάσεις όλες οι ηλεκτρικές συσκευές συνδέονται έτσι ώστε να λειτουργούν με την ίδια τάση η οποία συμπίπτει και με την ονομαστική τάση καθεμιάς.

Σε πολλές περιπτώσεις το φαινόμενο Joule έχει συνέπειες τις οποίες πρέπει να αποφεύγουμε. Μία από αυτές είναι η υπερθέρμανση των αγωγών, η οποία μπορεί να προκαλέσει ακόμα και πυρκαγιά. Στους αγωγούς μεταφοράς στους οποίους, για λόγους οικονομίας, χρησιμοποιούμε σύρματα μικρής διατομής είναι δυνατόν να



συμβεί υπερθέρμανση. Γι' αυτό τον λόγο η ηλεκτρική εγκατάσταση ενός σπιτιού οφείλει να τηρεί αυστηρά ορισμένες προδιαγραφές ασφαλείας. Σύμφωνα με τη νομοθεσία, η τιμή ρεύματος που διαρρέει κάθε αγωγό δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή ορισμένων Αμπέρ ανά mm^2 της διατομής του αγωγού. Πέρα όμως από αυτό, τα ηλεκτρικά κυκλώματα προστατεύονται και με **ασφάλειες** η λειτουργία των οποίων βασίζεται στο φαινόμενο Joule. Κάθε ασφάλεια χαρακτηρίζεται από τη μέγιστη τιμή ρεύματος, η οποία δημιουργεί διακοπή της λειτουργίας του κυκλώματος. Η τηκόμενη ασφάλεια είναι ένα εύτηκτο σύρμα μικρού μήκους, το οποίο παρεμβάλλεται στο κύκλωμα. Η αυτόματη ασφάλεια είναι ένας αυτόματος διακόπτης, το βασικό τμήμα του οποίου είναι ένα διμεταλλικό έλασμα. Όταν το έλασμα διαρρέεται από ρεύμα θερμαίνεται και διαστέλλεται ανομοιόμορφα, με αποτέλεσμα να κάμπεται. Εφόσον το ρεύμα υπερβεί τη χαρακτηριστική μέγιστη τιμή, η κάμψη του ελάσματος γίνεται τόση ώστε να διακόπτεται η αγώγιμη επαφή άρα και η ρευματοδότηση του κυκλώματος.

Οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των σπιτιών οφείλουν να τηρούν αυστηρά ορισμένες προδιαγραφές. Στον πίνακα σημειώνονται οι διατομές των αγωγών σε mm^2 και η τιμή κάθε ασφάλειας, ανάλογα με το είδος της κατανάλωσης.



Σύνδεση αντιστατών

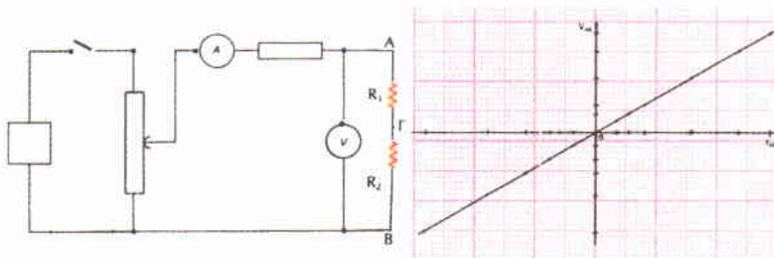
Οι «δρόμοι» της φυσικής είναι πάντοτε δύο. Ο ένας είναι ο δρόμος του πειράματος. Μέσα από αυτόν η έρευνα γίνεται με αμπερόμετρα, με βολτόμετρα, ποτενσιομετρικές διατάξεις, μετρήσεις, επε-

ξεργασία των δεδομένων και εξαγωγή συμπερασμάτων.

Ο άλλος είναι ο δρόμος της θεωρητικής σκέψης. Εδώ πρωταγωνιστούν οι γενικότεροι νόμοι της φυσικής τους οποίους –με τη βοήθεια των μαθηματικών– εφαρμόζουμε, αναζητώντας απαντήσεις σε συγκεκριμένα προβλήματα. Τα αποτελέσματα γίνονται αποδεκτά μόνο εφόσον και οι δύο δρόμοι μας οδηγήσουν στο ίδιο σημείο.

Σύνδεση σε σειρά

Το πείραμα. Διαθέτουμε δύο αντιστάτες, τον (ΑΓ) με $R_1 = 17{,}5\Omega$ και τον (ΓΒ) με $R_2 = 11{,}5\Omega$ τους οποίους συνδέομε σε σειρά. Το σύστημα (ΑΒ) που προκύπτει αποτελεί ένα δίπολο. Αναζητούμε τη χαρακτηριστική του. Με τη βοήθεια ποτενσιομετρικής διάταξης εφαρμόζουμε διάφορες τιμές τάσης στα άκρα του οπότε προκύπτουν και αντίστοιχες τιμές έντασης ρεύματος. Καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα και χαράσσουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη τάσης-ρεύματος.



V_{AB}(V)	0,24	0,40	0,60	1,20	1,80	2,20	–0,3	–0,6	–0,9	–1,4	–2,2
I_{AB}(mA)	9	14	21	41	61,6	75	–10	–20	30,5	47	74

Βλέπουμε ότι η χαρακτηριστική είναι μία ευθεία που περνάει από την αρχή των αξόνων. Αυτό θα πει ότι το δίπολο (ΑΒ) συμπεριφέρεται σαν αντιστάτης. Από τη χαρακτηριστική μπορούμε να υπολογίσουμε και την αντίστασή του (R). Είναι ίση με 29,3Ω, περίπου ίση δηλαδή με το άθροισμα των δύο αντιστάσεων. Γράφουμε $R \simeq R_1 + R_2$

Ο δρόμος της θεωρίας. Κατά τη σύνδεση δύο διπόλων (ΑΓ) και (ΓΒ) σε σειρά ισχύει $I_{A\Gamma} = I_{\Gamma B} = I_{AB}$ και $V_{AB} = V_{A\Gamma} + V_{\Gamma B}$ όπου I_{AB} είναι το ρεύμα του διπόλου (ΑΒ) και V_{AB} η τάση στα άκρα του.

Εφαρμόζουμε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Σύμφωνα με αυτήν η ηλεκτρική ισχύς (P) που μεταβιβάζεται στο σύστημα είναι ίση με το άθροισμα των ισχύων που καταναλώνουν οι αντιστάτες. Εφόσον διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα μπορούμε να γράψουμε $P = I^2 R_1 + I^2 R_2 = I^2 (R_1 + R_2)$. Ο αντιστάτης που θα μπορούσε

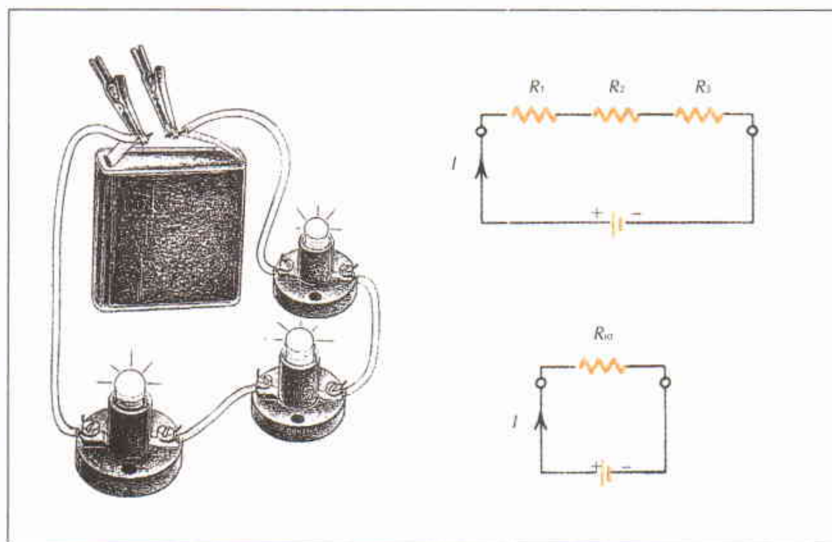
να αντικαταστήσει τους R_1 και R_2 με την έννοια να καταναλώνει μόνος του την ισχύ που καταναλώνουν οι δύο μαζί θα έπρεπε να έχει αντίσταση τέτοια ώστε να ισχύει $P = I^2 R_{ισ}$. Η αντίσταση αυτή λέγεται ισοδύναμη αντίσταση του συστήματος και συμβολίζεται με $R_{ισ}$. Από τις προηγούμενες σχέσεις γίνεται φανερό ότι

$$\mathbf{R_{ισ} = R_1 + R_2.}$$

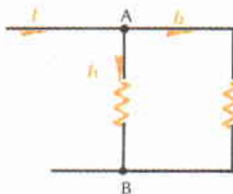
Βλέπουμε, δηλαδή, ότι η ισοδύναμη αντίσταση του διπόλου που προκύπτει από τη σύνδεση των R_1 και R_2. Γενικεύουμε.

Κατά τη σύνδεση των αντιστατών σε σειρά προκύπτει αντιστάτης η αντίσταση του οποίου είναι ίση με το άθροισμα των αντιστάσεων

$$\mathbf{R_{ισ} = R_1 + R_2 + R_3 + \quad + R_ν}$$



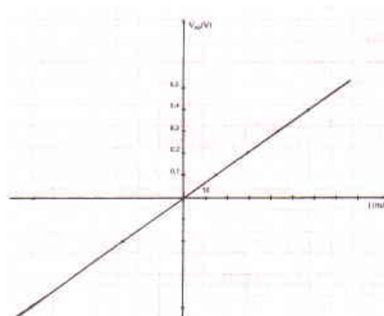
Παράλληλη σύνδεση



Το πείραμα. Συνδέουμε τώρα τους ίδιους αντιστάτες (R_1 = 17,5 Ω και R_2 = 11,5Ω) παράλληλα. Χρησιμοποιούμε πάλι ποτενσιομετρική διάταξη και αναζητούμε τη χαρακτηριστική του διπόλου που δημιουργήθηκε.

V_{AB} (V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	–0,2	–0,3	–0,5
I(mA)	14,4	29,8	43,4	57	99,0	–28	–42	–70,5

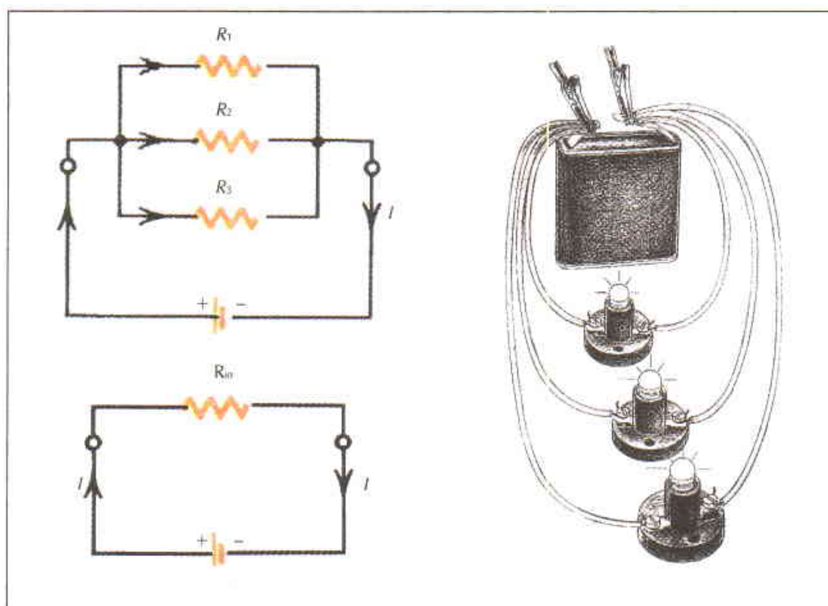
Είναι φανερό ότι το δίπολο που προκύπτει από τη σύνδεση είναι αντιστάτης, με αντίσταση η οποία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, από τη χαρακτηριστική. Είναι R ≃ 6,9Ω. Διαπιστώνουμε ότι η ισο-



δύναμη αντίσταση του διπόλου είναι μικρότερη και από τις δύο αντιστάσεις που χρησιμοποιήσαμε.

Ο δρόμος της θεωρίας. Αν είναι I_1 και I_2 τα ρεύματα που διαρρέουν τους δύο αντιστάτες σύμφωνα με τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff ισχύει $I = I_1+I_2$ (σχήμα).

Το χαρακτηριστικό βέβαια στοιχείο της παράλληλη σύνδεσης είναι η ισότητα των τάσεων (V) στα άκρα των δύο αντιστατών. Εφαρμόζουμε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Η ηλεκτρική ισχύς που μεταβιβάζεται στο σύστημα είναι ίση με το άθροισμα των ισχύων



που καταναλώνουν οι δύο αντιστάτες. Εφόσον οι τάσεις είναι ίσες μπορούμε να γράψουμε

$$P = \frac{V}{R_1} + \frac{V^2}{R_2} \text{ ή } P = V^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

Εφόσον για την ισοδύναμη αντίσταση – σύμφωνα με τον ορισμό – ισχύει $P = V^2/R_{ισ}$ εύκολα συμπεραίνουμε ότι

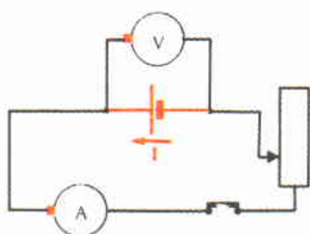
$$\frac{1}{R_{ισ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Κατά την παράλληλη σύνδεση αντιστατών προκύπτει αντιστάτης με αγωγιμότητα (1/R) ίση με το άθροισμα των αγωγιμοτήτων των αντιστατών.

Η γεννήτρια (πηγή) στο ηλεκτρικό κύκλωμα

Θα ασχοληθούμε τώρα με τις ηλεκτρικές γεννήτριες, τις οποίες θα λέμε και πηγές ηλεκτρεγερτικής δύναμης ή ηλεκτρικές πηγές. Προς το παρόν δεν θα εξετάσουμε ούτε την εσωτερική τους δομή ούτε και τα φυσικά φαινόμενα βάσει των οποίων λειτουργούν, αλλά θα περιοριστούμε στην περιγραφή του ρόλου που μπορούν να παίξουν σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Θα ασχοληθούμε πρώτα με τη χαρακτηριστική V = f(I) μιας γεννήτριας και στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη συμπεριφορά της από ενεργειακή σκοπιά.

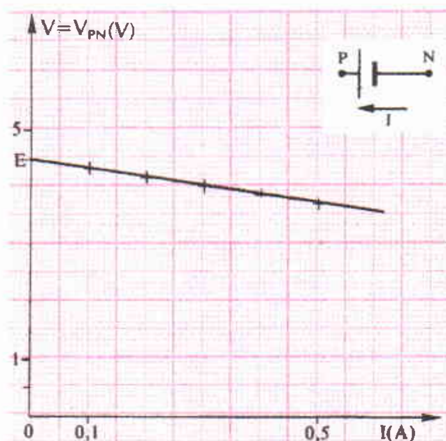
Η χαρακτηριστική μιας γεννήτριας



Έχουμε μπροστά μας μια συνηθισμένη ηλεκτρική στήλη «πλακέ» από αυτές που υπάρχουν στο εμπόριο με τα δύο γνωστά ελάσματα που αποτελούν τους πόλους της. Επιδιώκουμε να χαράξουμε τη χαρακτηριστική της γι' αυτό και δημιουργούμε ένα κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα με αμπερόμετρο, ροοστάτη και βολτόμετρο. Μετακινώντας τον ροοστάτη παίρνουμε διάφορες τιμές ρεύματος. Τις καταγράφουμε σε πίνακα μαζί με τις αντίστοιχες τιμές τάσης μεταξύ των πόλων της στήλης μας. Καλό θα είναι το ρεύμα να μην ξεπεράσει τα 500mA. Σε σύστημα ορθογωνίων αξόνων, χαράσουμε στη συνέχεια τη χαρακτηριστική V = f(I).



V_{PN} (V)	4,5	4,35	4,2	4,05	3,9	3,75
I (A)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5



Ηλεκτρεγερτική δύναμη

Το πρώτο πράγμα που παρατηρούμε είναι ότι η χαρακτηριστική τέμνει τον άξονα των τάσεων στο σημείο (4,5 V, 0 A). Βλέπουμε δηλαδή ότι χωρίς η στήλη να διαρρέεται από ρεύμα, η τάση στους πόλους της είναι 4,5 V και ότι η τιμή αυτή συμπίπτει με την ένδειξη *4,5 V*, η οποία αναγράφεται στο τυπωμένο χαρτί που περιβάλλει τη στήλη μας. Το «4,5 V» είναι η τιμή ενός μεγέθους, το οποίο αποτελεί για τη στήλη ένα «στοιχείο ταυτότητας» που λέγεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη.** Επειδή η πρώτη λέξη είναι πολυσύλλαβη συνηθίζεται η συντομογραφία ΗΕΔ. Το σύμβολο που θα χρησιμοποιούμε για να παριστάνουμε το μέγεθος είναι το Ε. Κάθε ηλεκτρική γεννήτρια (πηγή) συνεχούς ρεύματος χαρακτηρίζεται από μια ορισμένη ΗΕΔ.

Ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας πηγής είναι η τάση στους πόλους της όταν δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

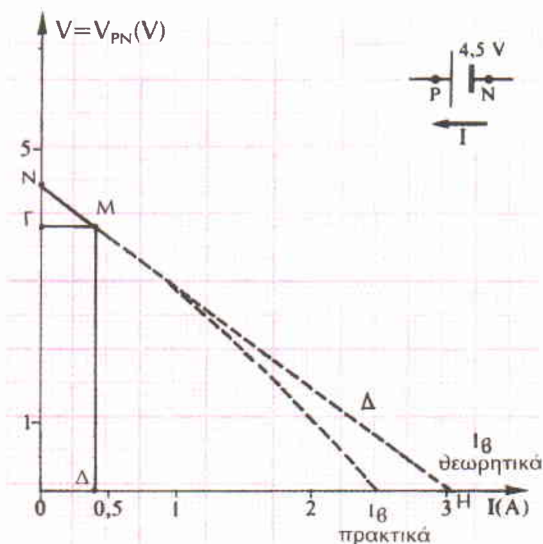
Είναι η πρώτη γνωριμία μας με το καινούριο μέγεθος. Παρακάτω θα δούμε πως αντιμετωπίζεται το ίδιο μέγεθος από ενεργειακή σκοπιά.

Επιστρέφουμε στη χαρακτηριστική V = f(I) της ηλεκτρικής στήλης. Εύκολα διαπιστώνουμε ότι, όσο αυξάνει το ρεύμα, η τάση στους πόλους της στήλης (πολική τάση) ελαττώνεται. Μάλιστα για την περιοχή –τουλάχιστον– από μηδέν μέχρι 500 mA η χαρακτηριστική είναι ευθύγραμμο τμήμα. Αν το προεκτείνουμε, βλέπουμε ότι η προέκτασή του τέμνει τον άξονα των ρευμάτων στο σημείο 3 Α. Αυτό το «3 Α» είναι ένα ακόμα στοιχείο που μας περιγράφει τη συγκεκριμένη ηλεκτρική πηγή. Είναι –θεωρητικά– το ρεύμα που θα περάσει από τη στήλη αν βραχυκυκλωθούν* οι δύο πόλοι της, αν, δηλαδή, αποκτήσουν το ίδιο δυναμικό. Είναι το λεγόμενο **ρεύμα βραχυκυκλώσεως** ($I_β$).

Να επιχειρήσουμε τώρα να συσχετίσουμε την πολική τάση και το αντίστοιχο ρεύμα για ένα οποιοδήποτε σημείο λειτουργίας της πηγής. Μπορούμε να το πετύχουμε επικαλούμενοι και έννοιες γεω-

---

** Όταν λέμε ότι βραχυκυκλώνουμε δύο σημεία κυκλώματος εννοούμε είτε ότι ακουμπάμε το ένα με το άλλο είτε ότι τα συνδέουμε με αγωγό αμελητέας αντίστασης οπότε έτσι κι αλλιώς αποκτούν ίσα δυναμικά.*



μετρικές. Από ένα τυχαίο σημείο Μ (V,I) της χαρακτηριστικής –την οποία θεωρούμε ευθεία– φέρνουμε τις κάθετες ΜΓ και ΜΔ στους άξονες V και I αντίστοιχα. Το τρίγωνο ΝΓΜ είναι όμοιο με το ΝΟΗ, συνεπώς ισχύει (ΝΓ)/(ΝΟ) = (ΓΜ)/(ΟΗ). Αλλά (ΝΟ) = Ε, (ΝΓ) = Ε – V, (ΟΗ) = $I_β$ και (ΓΜ) = I. Θα είναι λοιπόν

$$\frac{E-V}{E} = \frac{I}{I_β} \text{ άρα } V = E - I\frac{E}{I_β}.$$

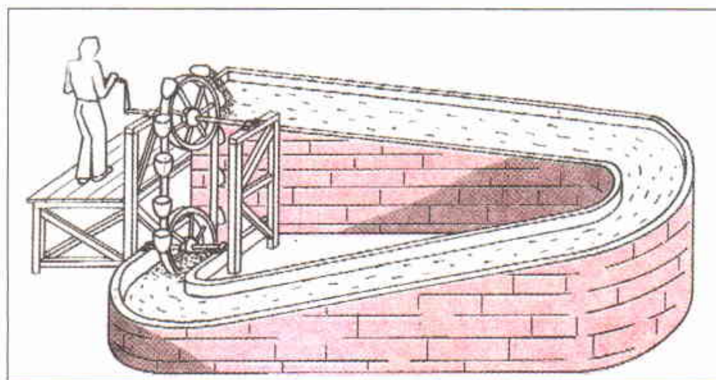
Το πηλίκο $E/I_β$ το οποίο έχει διαστάσεις αντίστασης, αποτελεί ένα ακόμα στοιχείο ταυτότητας της πηγής. Λέγεται **εσωτερική αντίσταση (r) της πηγής** και αποτελεί την ωμική αντίσταση του αγώγιμου τμήματος που υπάρχει στο εσωτερικό της. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε

$$V_π = E - Ir$$

και γενικεύοντας να πούμε ότι η πολική τάση μιας πηγής είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική της δύναμη μείον την πτώση τάσεως που δημιουργείται στην εσωτερική της αντίσταση κατά τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος.

Ο ενεργειακός ρόλος της γεννήτριας

Να μιλήσουμε τώρα και στη γλώσσα της ενέργειας. Η γεννήτρια στο ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε να μεταβιβάζεται διαρκώς ενέργεια στους φορείς ηλεκτρικού φορτίου που φθάνουν σ' αυτήν. Να μεταφέρονται, με άλλα λόγια, από περιοχές χαμηλού δυναμικού σε περιοχές όπου το δυναμικό είναι μεγαλύτερο. Αυτό μας φέρνει στο μυαλό μια μηχανή που μπορεί να ανεβάζει νερό, να μεταφέρει δηλαδή νερό από ση-



μεία χαμηλού (γήινου) δυναμικού, σε σημεία με δυναμικό μεγαλύτερο.



Έχουμε ήδη αναφέρει ότι η ηλεκτρική πηγή δεν είναι πηγή ηλεκτρικού φορτίου. Είναι ίσως, περιττό να πούμε, τώρα, ότι δεν είναι ούτε πηγή ενέργειας, με την έννοια ότι δεν δημιουργεί ενέργεια από μηδέν. Εξάλλου, από όσο ξέρουμε μέχρι σήμερα, αυτό είναι κάτι που οι φυσικοί νόμοι το αποκλείουν. Η γεννήτρια-πηγή είναι, όμως, ένας **ενεργειακός μετατροπέας.** Καταναλώνει ενέργεια κάποιας μορφής η οποία μπορεί να είναι μηχανική, χημική, θερμική, ακτινοβολίας και τη μετατρέπει σε ενέργεια με την οποία τροφοδοτεί το κύκλωμα. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της γεννήτριας, γι' αυτό και οι φυσικοί συνηθίζουν να λένε ότι η γεννήτρια είναι πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Δεν θα δυσκολευτούμε να εξετάσουμε τη σχέση ολικής ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρεγερτικής δύναμης και να καταλήξουμε σε έναν «ενεργειακό» ορισμό της ΗΕΔ.

Αναφερόμαστε σε κύκλωμα με μία μόνο πηγή. Όταν κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα (I), το γινόμενο «$V_\pi I$» αποτελεί, όπως είναι γνωστό, την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρεται στο «εξωτερικό» τμήμα του κυκλώματος, στο τμήμα, δηλαδή, που έχει ως άκρα του τους δύο πόλους της πηγής και βρίσκεται έξω από αυτήν. Από την άλλη, η ποσότητα I^2r αποτελεί την ηλεκτρική ισχύ που καταναλώνεται λόγω φαινομένου Joule στην εσωτερική αντίσταση της πηγής. Εφόσον δεχόμαστε ότι στο κύκλωμα δεν δημιουργείται ενέργεια, είναι λογικό να υποστηρίξουμε ότι το άθροισμα $V_\pi I + I^2r$ μας δίνει την ολική ηλεκτρική ισχύ ($P_{ολ}$) του κυκλώματος και να γράψουμε $P_{ολ} = V_\pi I + I^2r$ ή $P_{ολ} = (V_\pi + Ir)I$ οπότε, σύμφωνα και με την προηγούμενη εξίσωση $V_\pi = E - Ir$, καταλήγουμε στην

$$P_{ολ} = EI$$

Η εξίσωση μάς λέει ότι η ολική ηλεκτρική ισχύς του κυκλώματος είναι ανάλογη προς το ρεύμα που διαρρέει την πηγή και ότι ο συ-

ντελεστής αναλογίας είναι η ΗΕΔ της πηγής. Μπορούμε, τώρα, να διατυπώσουμε και τον «ενεργειακό» ορισμό της ΗΕΔ.

Ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας πηγής (ή ενός κυκλώματος) λέγεται το πηλίκο της ολικής ηλεκτρικής ισχύος με την οποία τροφοδοτείται το κύκλωμα προς την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την πηγή.

Γράφουμε $\mathbf{E} = \dfrac{\mathbf{P_{\text{ολ}}}}{\mathbf{I}}$.

Ηλεκτρική ισχύς είναι η ανά μονάδα χρόνου αντίστοιχη ηλεκτρική ενέργεια ενώ ένταση ρεύματος είναι η ανά μονάδα χρόνου ποσότητα διακινούμενου ηλεκτρικού φορτίου. Μπορούμε, συνεπώς να γράφουμε $\mathbf{E = W_{\text{ολ}} / q}$ και να λέμε ότι η ΗΕΔ εκφράζει την ανά μονάδα φορτίου ποσότητα ολικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται το κύκλωμα.



Κάθε βαγονάκι παριστάνει φορτίο ενός Coulomb. Η ηλεκτρική πηγή δεν δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο, αλλά αποδίδει σε κάθε Coulomb φορτίου ορισμένη ποσότητα ενέργειας που καθορίζεται από την ηλεκτρεγερτική της δύναμη. Αν η πηγή είναι για παράδειγμα, 4,5 V σε κάθε Coulomb φορτίου θα αποδίδει 4,5 Joules ηλεκτρικής ενέργειας.

Ηλεκτρεγερτική δύναμη και διαφορά δυναμικού

Όπως και η διαφορά δυναμικού, η ηλεκτρεγερτική μετριέται με Volts. Ανάμεσα σ' αυτά τα δύο ισοδιάστατα μεγέθη υπάρχουν διαφορές τις οποίες θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε. Ας υποθέσουμε ότι αναφερόμαστε σε κύκλωμα με μία μόνο πηγή.

Η διαφορά δυναμικού

1. Αναφέρεται πάντοτε σε δύο –διατεταγμένα– σημεία του κυκλώματος, δηλαδή σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του. Εκφράζει την ανά μονάδα φορτίου ηλεκτρική ενέργεια η οποία είτε προσφέρεται στο τμήμα είτε αποδίδεται από το τμήμα στο υπόλοιπο κύκλωμα.

2. Ειδικά η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πόλων της πηγής (πολική τάση, $V_π$) μας δίνει την ανά μονάδα φορτίου ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται στο «εξωτερικό» μόνο τμήμα του κυκλώματος. Δεν αποτελεί κάποιο «στοιχείο ταυτότητας» της ηλεκτρικής πηγής. Η τιμή της εξαρτάται από την πηγή, αλλά και από τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος.

3. Το γινόμενο «$V_π \cdot I$» (της πολικής τάσης επί την ένταση του ρεύματος που διαρρέει την πηγή) μας δίνει την ηλεκτρική ισχύ που προσφέρεται στο «εξωτερικό» –μόνο– τμήμα του κυκλώματος. Η ισχύς αυτή είναι μικρότερη από την ολική κατά την ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος που καταλίσκεται, λόγω φαινομένου Joule, στην εσωτερική αντίσταση.

$$V_π I = P_{ολ} - I^2 r$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη

1. Δεν αναφέρεται σε δύο σημεία του κυκλώματος, αλλά στο σύνολο του κυκλώματος. Χρησιμοποιούμε τη φράση *ΗΕΔ ενός κυκλώματος* και επειδή ως πηγή της ΗΕΔ του κυκλώματος θεωρούμε τη γεννήτρια-πηγή, συνηθίζουμε να λέμε και *ΗΕΔ της πηγής*. Εκφράζει την ανά μονάδα φορτίου ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται ολόκληρο το κύκλωμα εξ αιτίας της παρουσίας της πηγής.

2. Αποτελεί ένα στοιχείο ταυτότητας της πηγής το οποίο δεν εξαρτάται από τα υπόλοιπα στοιχεία του κυκλώματος.

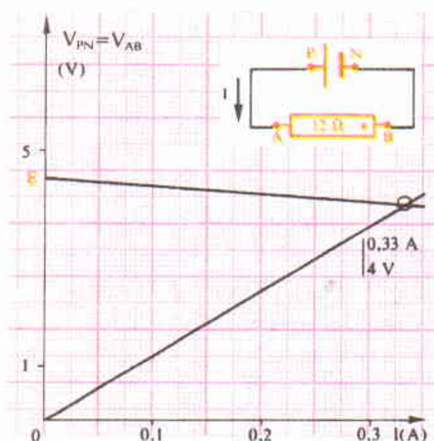
3. Το γινόμενο «$E \cdot I$» (της ΗΕΔ της πηγής επί την ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει) μας δίνει την ολική ηλεκτρική ισχύ του κυκλώματος.

$$E \cdot I = P_{ολ}$$

Η εξίσωση $V_π = E - Ir$ επισημαίνει ότι η ΗΕΔ μιας πηγής είναι μεγαλύτερη από την πολική τάση, εφόσον η πηγή διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η ΗΕΔ συμπίπτει με τη μέγιστη πολική τάση που μπορεί να εμφανίσει η πηγή. Αυτό συμβαίνει όταν η πηγή δεν διαρρέεται από ρεύμα. Μπορούμε να θεωρούμε επίσης ότι οι τιμές τους συμπίπτουν εφόσον η εσωτερική αντίσταση της πηγής θεωρηθεί –σε σχέση με τις υπόλοιπες αντιστάσεις του κυκλώματος– ασήμαντη.

Κύκλωμα με γεννήτρια και αντιστάτη

Μπορούμε να «προβλέψουμε» το ρεύμα που θα περάσει από ένα κύκλωμα γνωστών στοιχείων πριν να το συναρμολογήσουμε. Η διαδικασία λέγεται *επίλυση του κυκλώματος*. Σε περίπτωση που το κύκλωμα αποτελείται από αντιστάτη γνωστής αντίστασης (R) και από γεννήτρια με γνωστά στοιχεία ταυτότητας (E, r), μπορούμε να έχουμε τις παρακάτω τρεις προσεγγίσεις στο πρόβλημα.



α. Γραφική προσέγγιση. Χαράσσουμε σε κοινό σύστημα αξόνων τη χαρακτηριστική V = f(I) της πηγής και τη χαρακτηριστική του ωμικού αντιστάτη. Το σημείο τομής θα μας δώσει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

Αν τα στοιχεία ταυτότητας της πηγής είναι E = 4,5 V, r = 1,5 Ω και η αντίσταση του αντιστάτη R = 12 Ω, το ρεύμα θα είναι I = 0,33 A.

β. Προσέγγιση μέσω της διατήρησης της ενέργειας. Σ' ένα κύκλωμα που αποτελείται από πηγή και αντιστάτη, η μόνη ενεργειακή διαδικασία θα είναι μια αδιάκοπη μετατροπή της ενέργειας, με την οποία τροφοδοτεί η πηγή το κύκλωμα, σε θερμική ενέργεια και στην αντίσταση R αλλά και στην εσωτερική αντίσταση r της γεννήτριας. Σύμφωνα με την αρχή της διατήρησης της ενέργειας μπορούμε να γράφουμε.

Ανά μονάδα χρόνου προσφερόμενη ολική ενέργεια	=	Ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που καταναλίσκεται στην αντίσταση R.	+	Ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που καναταλίσκεται στην εσωτερική αντίσταση r.
EI	=	I^2R	+	I^2r

$$\text{οπότε} \quad I = \frac{E}{R+r}$$

Η τελευταία αυτή εξίσωση αναφέρεται και ως εξίσωση του *νόμου Ohm για κλειστό κύκλωμα* με αντιστάτη και πηγή. Αν τα στοιχεία ταυτότητας της πηγής είναι (4,5 V, 1,5Ω) και R = 12 Ω τότε από την εξίσωση παίρνουμε την τιμή της έντασης I = 0,33 A.

γ. Προσέγγιση μέσω του δεύτερου κανόνα Kirchhoff. Ο δεύτερος κανόνας του Kirchhoff μας λέει ότι κατά μήκος ενός κλειστού κυκλώματος το άθροισμα των διαφορών δυναμικού είναι μηδέν. Τον εφαρμόζουμε: $V_{AB} + V_{BN} + V_{NP} + V_{PA} = 0$ (επόμενο σχήμα).

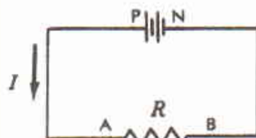
Αλλά $V_{BN} = V_{PA} = 0$ (οι αγωγοί συνδέσεως έχουν αμελητέα αντίσταση).

$V_{AB} = IR$ (ο αγωγός AB είναι αντιστάτης).

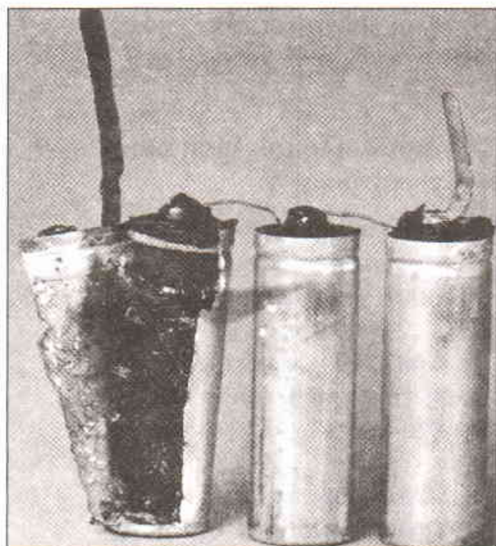
$V_{NP} = -V_{PN} = -(E - Ir)$ (Η V_{PN} είναι πολική τάση της γεννήτριας).

Συνεπώς $IR = E - Ir$ ή $I = E / (R + r)$.

Βλέπουμε ότι, είτε ακολουθήσουμε το μονοπάτι της διατήρησης της ενέργειας είτε ακολουθήσουμε τον δεύτερο κανόνα του Kirchhoff, φτάνουμε στο ίδιο αποτέλεσμα.



Θα πρέπει να προσέξουμε ότι οι αγωγοί PA και NB που συνδέουν τους πόλους της πηγής με τα άκρα του αντιστάτη είναι αγωγοί συνδέσεως με ασήμαντη αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι $V_{PA} = 0$ ή $V_P = V_A$ τα σημεία δηλαδή του κυκλώματος A και P είναι ισοδυναμικά. Το ίδιο ισχύει και για τα σημεία B και N. Η τάση, λοιπόν, στους πόλους της πηγής είναι απολύτως ίση με την τάση στα άκρα του αντιστάτη.



Σύνδεση πηγών

1. Σύνδεση σε σειρά

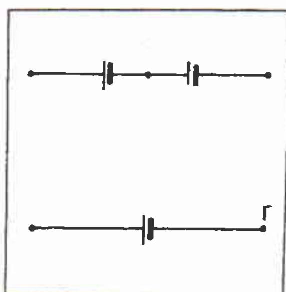
Ανοίγουμε την «πλακέ» ηλεκτρική στήλη των 4,5 V. Βλέπουμε ότι στο εσωτερικό της υπάρχουν τρία κυλινδρικά ηλεκτρικά στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικά σύρματα. Παρατηρούμε ότι ο θετικός πόλος του πρώτου στοιχείου συνδέεται αγώγιμα με τον αρνητικό πόλο του δεύτερου, του οποίου ο θετικός πόλος συνδέεται με τον αρνητικό του τρίτου. Κατ' αυτόν τον τρόπο παραμένουν δύο πόλοι «ελεύθεροι», ο θετικός του πρώτου και ο αρνητικός του τρίτου, για να αποτελέσουν τους πόλους ηλεκτρικής στήλης. Πρόκειται για σύνδεση πηγών σε σειρά.

Με βολτόμετρο ή με ηλεκτρόμετρο διαπιστώνουμε επίσης ότι η τάση ανάμεσα στους πόλους κάθε στοιχείου, όταν δεν διαρρέεται από ρεύμα, είναι 1,5 V. Είναι η ηλεκτρεγερτική του δύναμη.

Με τον ίδιο τρόπο συνδέονται δέκα συσσωρευτές Νικελίου - Καδμίου των 1,2 V και δημιουργείται ένας συσσωρευτής «δωδεκάβολτος».



Η συνηθισμένη «δωδεκάβολτη» μπαταρία (συσσωρευτής μολύβδου) των αυτοκινήτων αποτελείται από έξι στοιχεία. Καθένα τους έχει E = 2 V, r = 0,01 Ω και είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Εννοείται ότι ο χαρακτηρισμός «δωδεκάβολτη» αναφέρεται στην ηλεκτρεγερτική της δύναμη.



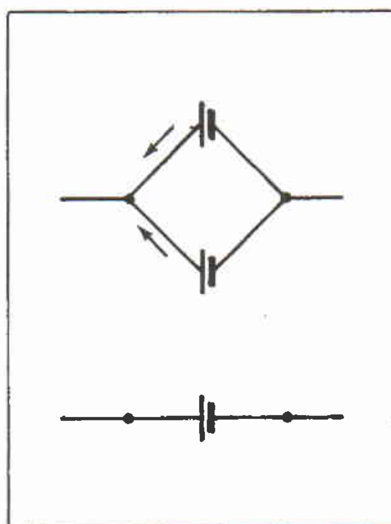
Μπορούμε να αποδείξουμε ότι κατά τη σύνδεση πηγών σε σειρά το σύστημα που προκύπτει ισοδυναμεί με ηλεκτρική πηγή της οποίας:

α) η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ίση με το άθροισμα των ΗΕΔ των πηγών.

β) η εσωτερική της αντίσταση είναι ίση με το άθροισμα των εσωτερικών αντιστάσεων των πηγών.

$$E_{ισ} = E_1 + E_2 + E_3 + ... + E_ν \text{ και}$$
$$r_{ισ} = r_1 + r_2 + r_3 + ... + r_ν.$$

Αν οι γεννήτριες είναι όμοιες, θα ισχύει $E_{ισ} = νE$ και $r_{ισ} = νr$.



2. Παράλληλη σύνδεση όμοιων γεννητριών

Αν συνδέσουμε αγώγιμα όλους τους θετικούς πόλους ενός συνόλου γεννητριών και συνδέσουμε –στη συνέχεια– αγώγιμα όλους τους αρνητικούς πόλους των γεννητριών αυτών θα έχουμε παράλληλη σύνδεση.

Εξετάζουμε τη σύνδεση αυτού του τύπου για την περί-

πτωση που οι γεννήτριες είναι όμοιες. Ας υποθέσουμε ότι καθεμιά από αυτές έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη E και εσωτερική αντίσταση r.

Τόσο η πειραματική όσο και η θεωρητική έρευνα καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα που προκύπτει ισοδυναμεί με ηλεκτρική πηγή της οποίας

α) η ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας από τις πηγές

β) η εσωτερική αντίσταση είναι ίση με το κλάσμα r/μ όπου μ το πλήθος των πηγών.



Ερωτήσεις και προβλήματα

Θεωρείται γνωστό το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο $e = 1,6\ 10^{-19}$ C.



2.1. Ποιες είναι οι τρεις ομάδες φαινομένων από τα οποία προδίδεται η ύπαρξη ηλεκτρικού ρευματος; Αναφέρετε δύο φαινόμενα για κάθε ομάδα.

2.2. Η αλληλεπίδραση του ηλεκτρικού ρεύματος με μαγνήτη έχει, βέβαια, δύο όψεις. Ποιες είναι αυτές;

2.3. Το καλοκαίρι του 1820 ο Δανός Oersted ανακοίνωσε το αποτέλεσμα ενός πειράματος το οποίο θεωρείται ιστορικό. Ποιο ήταν το πείραμα; Γιατί θεωρείται ιστορικό;

2.4. Τι ακριβώς είναι η δύναμη Laplace; Ποια υλικά θα χρειαστουμε ώστε, αν τα συναρμολογήσουμε, να εκδηλωθεί η δύναμη αυτή;

2.5. Περιγράψτε δύο φαινόμενα τα οποία ενισχύουν την κυρίαρχη άποψη ότι το «ηλεκτρικό ρεύμα είναι κατευθυνόμενη κίνηση ηλεκτρικού φορτίου;» Ποια σωματίδια είναι οι φορείς του φορτίου αυτού;

2.6. Τι θεωρείται φορά του ηλεκτρικού ρεύματος;

2.7. Όταν ένας μεταλλικός αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα «υπάρχουν» τρεις διαφορετικές ταχύτητες α) η ταχύτητα της θερμικής κίνησης των ελεύθερων ηλεκτρονίων β) η ταχύτητα μετακίνησης των ηλεκτρονίων και γ) ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον αγωγό. Ποια από τις ταχύτητες αυτές είναι η μεγαλύτερη; Ποια είναι η μικρότερη;

2.8. Τι λέγεται ένταση ηλεκτρικού ρεύματος; Πως τη μετράμε; Ποια είναι η μονάδα μετρήσεως;

2.9. Πως διατυπώνεται ο πρώτος κανόνας του Kirchhoff; Γιατί λέγεται *κανόνας* και όχι *νόμος;*

2.10. Πως μπορούμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ενός κυκλώματος;

2.11. Πως διατυπώνεται ο δεύτερος κανόνας του Kirchhoff; Γιατί λέγεται *κανόνας* και όχι *νόμος;*

2.12. Η μεταβιβαζόμενη σ' ένα τμήμα κυκλώματος ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με το γινόμενο της τάσης στα άκρα του τμήματος επί την ένταση του ρεύματος. Πως αποδεικνύεται;

2.13. Τι λέγεται αντίσταση ενός αγωγού;

2.14. Πως διατυπώνεται ο νόμος του Ohm;

2.15. Από τι εξαρτάται η αντίσταση ενός κυλινδρικού αγωγού;

2.16. Τι ρόλο παίζει ένα ποτενσιόμετρο; Σε τι διαφέρει από έναν ροοστάτη;

2.17. Τι είναι το φαινόμενο Joule; Αναφέρετε δύο ηλεκτρικές συσκευές κατά τη λειτουργία των οποίων το φαινόμενο αυτό παίζει αρνητικό ρόλο;

2.18. Πως αποδεικνύεται θεωρητικά ότι κατά τη σύνδεση δύο αντιστατών σε σειρά η ισοδύναμη αντίσταση είναι ίση με το άθροισμα των δύο αντιστάσεων;

2.19. Πως αποδεικνύεται θεωρητικά η σχέση της ισοδύναμης αντίστασης με τις δυο αντιστάσεις κατά την παράλληλη σύνδεση;



Ερωτήσεις και προβλήματα

2.20. Πως είναι η χαρακτηριστική καμπύλη μιας γεννήτριας; Πως μπορούμε να υπολογίσουμε από την καμπύλη αυτή την τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και την τιμή του ρεύματος βραχυκυκλώσεως;

2.21. Τι λέγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας γεννήτριας;

2.22. Τι εννοούμε λέγοντας ότι η γεννήτρια είναι ένας ενεργειακός μετατροπέας;

2.23. Γράψτε την εξίσωση που εκφράζει το νόμο του Ohm για κλειστό κύκλωμα. Πως αποδεικνύεται βάσει του νόμου διατήρησης της ενέργειας;



Να αναρωτηθούμε...

2.24. Υπάρχουν τρεις, τουλάχιστον, ομάδες φαινομένων από τα οποία προδίδεται η ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος. Είναι:
α. .... της θερμοκρασίας των μεταλλικών αγωγών
β. .... φαινόμενα, όπως ....
γ. .... ηλεκτρικών ρευμάτων ....
Τα φαινόμενα, όμως, που εκδηλώνονται οπωσδήποτε είναι αυτά της .... ομάδας.
Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά χρησιμοποιώντας λέξεις από τις παρακάτω:
• Θέρμανση • Αυξομείωση • Τρίτης • Αύξηση • Η ηλεκτρόλυση • Και αγωγών • Θερμικά • Και μαγνητών • Πρώτης • Χημικά • Αλληλεπίδραση.

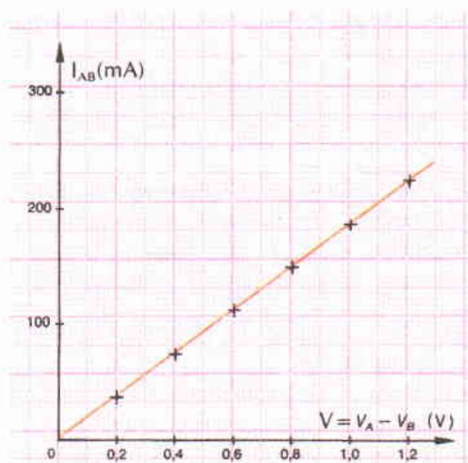
2.25. Με ποιες από τις παρακάτω προτάσεις συμφωνείτε;
α. Τα θερμικά φαινόμενα - αποτέλεσμα του ηλεκτρικού ρεύματος - οδήγησαν τη θεωρητική σκέψη στην επινόηση της έννοιας *φορά του ηλεκτρικού ρεύματος*.
β. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αντίθετη από τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων ενός ρευματοφόρου μεταλλικού αγωγού.
γ. Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος καθορίζεται από την πολικότητα της τροφοδότησης.
δ. Το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί εκτροπή της μαγνητικής βελόνας προς ορισμένη πλευρά. Αν αλλάξει η φορά του, η μαγνητική βελόνα θα εκτραπεί προς την άλλη πλευρά.

2.26. Με ποιες από τις παρακάτω προτάσεις συμφωνείτε;
α. Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος λέγεται το πηλίκο του φορτίου που περνά από μια διατομή του αγωγού σε ορισμένο χρόνο προς τον χρόνο αυτό. Ο ορισμός ισχύει για την περίπτωση χρονικά σταθερού ρεύματος.
β. Συνήθως μετράμε την ένταση του ρεύματος βασιζόμενοι στην αλληλεπίδραση του με κάποιο μαγνήτη.
γ. Συνήθως μετράμε την ένταση του ρεύματος βασιζόμενοι στον ορισμό της. Μετράμε δηλαδή το ηλεκτρικό φορτίο με ειδικό όργανο και το χρόνο με χρονόμετρο.
δ. Η μονάδα μετρήσεως του μεγέθους *ένταση ρεύματος* είναι το 1 βολτ.
ε. Η μονάδα μετρήσεως του φορτίου (1 κουλόμπ) δεν είναι θεμελιώδης αλλά ορίζεται από τις θεμελιώδεις μονάδες έντασης ηλεκτρικού ρεύματος και χρόνου.

2.27. Έχουμε το όργανο της σελίδας 80.
α) Βρείτε την τάση
ι) όταν ο μεταγωγός είναι στη θέση 30 και ο δείκτης στη θέση του σχήματος
ιι) όταν ο μεταγωγός μετακινηθεί στη θέση 10 και ο δείκτης στη θέση του σχήματος

β) Θέλετε να μετρήσετε τάση 76V. Τοποθετήστε τον μεταγωγό στην πιο κατάλληλη θέση. Ποια θα είναι η ένδειξη;

2.28. Υπολογίστε την αντίσταση



2.29. Ποιοι από τους παρακάτω αγωγούς υπακούουν στον νόμο του Ohm;
α. χάλκινο καλώδιο β. λυχνία κενού γ. κύλινδρος από αλουμίνιο δ. Κρυσταλλικός ανορθωτής.

2.30. Σε ποιο φυσικό μέγεθος αντιστοιχεί καθεμιά από τις παρακάτω μονάδες μετρήσεως;
α. 1Ω β. 1V γ. 1J δ. 1C ε. 1A.

2.31. Στη ΔΕΗ πληρώνουμε για παροχή ηλεκτρικού φορτίου, ηλεκτρικής ισχύος ή ηλεκτρικής ενέργειας;

2.32. Δύο μεταλλικά ομογενή σύρματα Α και Β έχουν ακριβώς την ίδια αντίσταση. Αν το μήκος και η διάμετρος του σύρματος Α είναι διπλάσια των αντίστοιχων μεγεθών του Β, ποια από τις παρακάτω σχέσεις μεταξύ των ειδικών αντιστάσεων ρ_A και ρ_B είναι η σωστή;

α) $\rho_A = \rho_B/4$ **β)** $\rho_B = \rho_A/2$ **γ)** $\rho_A = \rho_B$
δ) $\rho_A = 2\rho_B$ **ε)** $\rho_A = 4\rho_B$

2.33. Ποιος έχει μεγαλύτερη αντίσταση, ένας λαμπτήρας των 60W ή ένας των 100W; Εξηγήστε.

2.34. Λαμπτήρες συνδέονται σε σειρά και ρευματοδοτούνται με ορισμένη τάση.
α) Αν ένας απ' αυτούς «καεί» τι θα συμβεί στους υπόλοιπους;
β) Αν προστεθούν σε σειρά περισσότεροι λαμπτήρες, τι θα συμβεί με τον φωτισμό των λαμπτήρων;

2.35. Στο σπίτι σας οι λαμπτήρες συνδέονται σε σειρά ή σε διακλάδωση; Δικαιολογήστε την απάντηση.

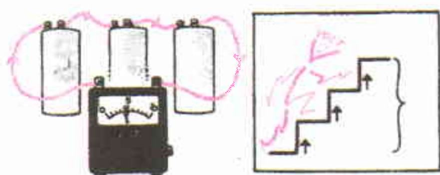
2.36. Κατά τη σύνδεση δύο αντιστατών σε σειρά.
α) Η μεταβιβαζόμενη στο σύστημα ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με το άθροισμα των ισχύων που καταναλίσκουν οι δύο αντιστάτες
β) Η ισοδύναμη αντίσταση είναι μικρότερη από το άθροισμα των δυο αντιστάσεων
γ) Η τάση στα άκρα του ενός είναι οπωσδήποτε ίση με την τάση στα άκρα του άλλου
δ) Οι δύο αντιστάτες διαρρέονται από ρεύματα ίσων εντάσεων
Με ποια από τα παραπάνω συμφωνείτε;

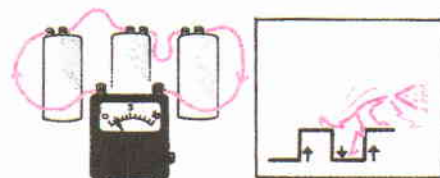
2.37. Κατά την παράλληλη σύνδεση δύο αντιστατών
α) Η μεταβιβαζόμενη στο σύστημα ηλεκτρική ισχύς είναι ίση με το άθροισμα των ισχύων που καταναλίσκουν οι αντιστάτες.
β) Η ισοδύναμη αντίσταση είναι μικρότερη από το άθροισμα των δυο αντιστάσεων
γ) Οι δυο αντιστάτες διαρρέονται από ρεύματα ίσων εντάσεων μόνον εφόσον οι αντιστάσεις τους είναι ίσες.
δ) Η τάση στα άκρα του ενός δεν είναι ίση με

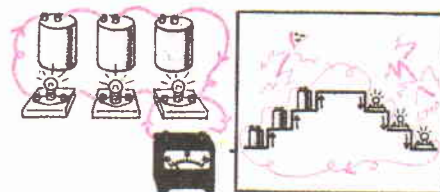
την τάση στα άκρα το άλλου
Με ποια από τα παραπάνω συμφωνείτε;

2.38. Η μεταβιβαζόμενη σ' ένα τμήμα κυκλώματος ηλεκτρική ισχύς
α) Είναι πάντοτε ίση με το γινόμενο της τάσης στα άκρα του τμήματος επί το ρεύμα (I) που διαρρέει το τμήμα.
β) Είναι σε κάθε περίπτωση ίση με το γινόμενο IR όπου R η αντίσταση του τμήματος.
γ) Είναι η ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη στο τμήμα ενέργεια.
Με ποια από τα παραπάνω συμφωνείτε;

2.39. Σχολιάστε όλα όσα παριστάνονται καθώς και όσα υπονοούνται με τα σκίτσα και τα σχήματα, τα οποία παραθέτουμε.







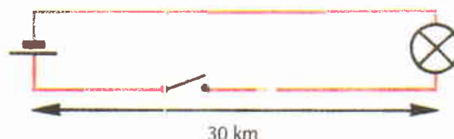
2.40. Η ηλεκτρική πηγή σ' ένα κύκλωμα
α) Παράγει ηλεκτρικά φορτία.
β) Είναι πηγή ενέργειας υπό την έννοια ότι παράγει ενέργεια από το μηδέν.
γ) Είναι ενεργειακός μετατροπέας.
δ) Έχει ως στοιχεία ταυτότητας την ηλεκτρεγερτική δύναμη και την εσωτερική αντίσταση.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

2.41. Συναρμολογούμε ένα κύκλωμα με ηλεκτρική πηγή, διακόπτη και αντιστάτη. Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά:
Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός η τάση στους πόλους της πηγής είναι .... την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής. Όταν κλείσουμε το διακόπτη η .... είναι ίση με το γινόμενο της έντασης του ρεύματος επί την ΗΕΔ της πηγής, η πολική τάση της πηγής είναι .... την τάση στα άκρα του αντιστάτη. Η ΗΕΔ της πηγής είναι .... την πολική τάση ενώ η .... είναι ίση με το τετράγωνο της έντασης του ρεύματος επί την τιμή της αντίστασης.



Να λύσουμε προβλήματα

2.42. Τη χρονική στιγμή t = 0 κλείνουμε τον διακόπτη του κυκλώματος.
α) Πότε θα ανάψει ο λαμπτήρας;
β) Ποια θα είναι η φορά της κίνησης των ηλεκτρονίων στους αγωγούς;
γ) Μετά πόσο χρόνο ένα ηλεκτρόνιο θα φτάσει στο λαμπτήρα, αν τη χρονική στιγμή t = 0 βρίσκεται στην περιοχή της πηγής; (Η απάντησή σας θα δοθεί προσεγγιστικά).

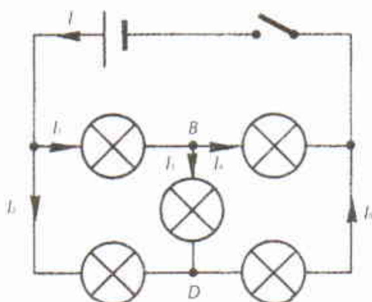




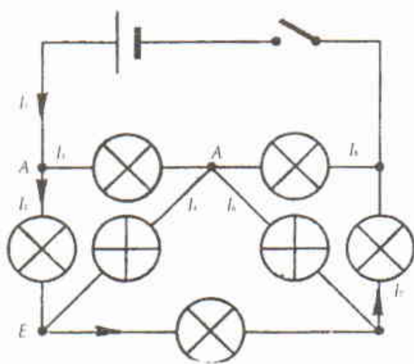
Ερωτήσεις και προβλήματα

2.43. Το ρεύμα της δέσμης ηλεκτρονίων σε μια τηλεόραση είναι 6μA. Πόσα ηλεκτρόνια ανά δευτερόλεπτο «χτυπάνε» στην οθόνη της;

2.44. Στο κύκλωμα του σχήματος είναι γνωστό ότι $I = 2A$, $I_1 = 1A$, $I_4 = 0{,}5A$.
Υπολογίστε τις τιμές I_2, I_3, I_5 των αντίστοιχων ρευμάτων.



2.45. Θεωρήστε το κύκλωμα του σχήματος. Δίνονται οι τιμές $I_1 = 10A$, $I_2 = 4A$, $I_5 = 2A$, $I_4 = 6A$ όταν κλείνουμε τον διακόπτη. Υπολογίστε τις τιμές και προσδιορίστε τις φορές των υπόλοιπων ρευμάτων.



2.46. Στο σπίτι έχουμε ανάψει ταυτόχρονα τρεις λάμπες των 220V/100 W, τον θερμοσίφωνα 220V/4000 W κι ένα στεγνωτήρα μαλλιών 220V/800 W. Πόσο ρεύμα περνάει από κάθε μια συσκευή; Πόσα κιλοβατώρια ηλεκτρικής ενέργειας θα καταναλωθούν αν οι συσκευές αυτές λειτουργήσουν ταυτόχρονα επί 20 λεπτά;

2.47. Σας ζητούμε να προβλέψετε την ένταση του ρεύματος που θα διαρρέει έναν αντιστάτη 2kΩ αν στα άκρα του εφαρμόσουμε τάση 24 V. Πόσα ηλεκτρόνια θα διέρχονται από μία διατομή του σε κάθε δευτερόλεπτο;

2.48. Διαφόρων τιμών ωμικοί αντιστάτες συνδέονται παράλληλα. Δικαιολογήστε τον ισχυρισμό: «Η ισοδύναμη αντίστασή τους έχει τιμή μικρότερη και από τη μικρότερη αντίσταση».

2.49. Ένα χάλκινο σύρμα έχει μήκος 1m και εμβαδόν διατομής $1mm^2$. Στα άκρα του εφαρμόζεται τάση 12V. Υπολογίστε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που περνούν από μία διατομή του σε χρόνο 1min. Δίνεται η ειδική αντίσταση του χαλκού ίση με $1{,}7.10^{8}Ωm$.

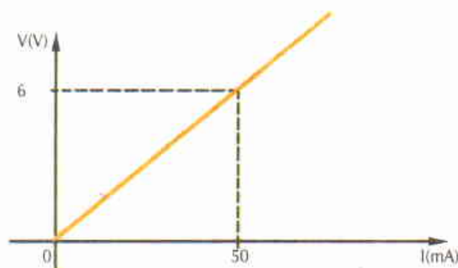
2.50. Ένα ομογενές κομμάτι χαλκού έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων 20 cm x 30 cm x 60 cm. Κάθε φορά που διαλέγουμε δύο απέναντι έδρες και τις θεωρούμε «άκρα» του, προκύπτει ένα δίπολο, η αντίσταση του οποίου εξαρτάται από το ζευγάρι εδρών που διαλέξαμε. Υπολογίστε την τιμή της αντίστασης σε κάθε μία περίπτωση. Θεωρείται γνωστό ότι η ειδική αντίσταση του χαλκού είναι $1{,}7.10^{8}Ωm$.

2.51. Το σώμα μας είναι αγωγός του ηλεκτρισμού. Φορείς του κινουμενου φορτίου είναι τα ιόντα Νατρίου, Καλίου, Χλωρίου και Μαγνησίου. Από μετρήσεις βρέθηκε ότι η ειδική αντίστασή του είναι περί τα 5Ωm. Εκτιμήστε την ηλεκτρική αντίσταση του δείκτη του χεριού σας. Στη συνέχεια, υπολογίστε το ρεύμα

που θα περάσει αν εφαρμοστεί τάση 12 V.

2.52. Για τα χάλκινα σύρματα των εσωτερικών εγκαταστάσεων το μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα είναι 11 A ανά mm^2 διατομής, γιατί αλλοιώς οι αγωγοί μέσα στους τοίχους υπερθερμαίνονται. Οι αγωγοί του δωματίου σας έχουν διατομή 1,5 mm^2. Πόση είναι η συνολική μέγιστη ισχύς των συσκευών, που θα μπορούσαν να λειτουργήσουν μέσα στο δωμάτιο;

2.53. Η χαρακτηριστική ενός διπόλου παριστάνεται στο σχήμα. Το δίπολο συνίσταται από δύο ωμικούς αγωγούς και ο ένας απ' αυτούς έχει αντίσταση R_1 = 300Ω. Με ποιο

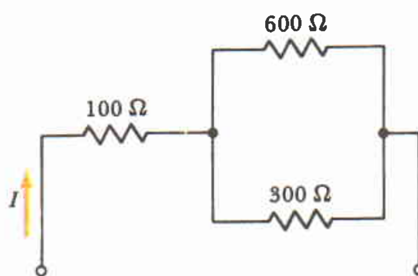


τρόπο συνδέονται οι δύο αγωγοί; Ποια είναι η τιμή της αντίστασης του δεύτερου αγωγού;

2.54. Τρεις αντιστάτες R_1 = 20Ω, R_2 = 4Ω, R_3 = 16Ω συνδέονται σε σειρά και η τάση στα άκρα του συστήματος είναι 12V. Σας ζητούμε να υπολογίσετε α) την ένταση του ρεύματος και β) την τάση στα άκρα του R_2.

2.55. Δύο αντιστάτες R_1 = 140Ω και R_2 συνδέονται σε σειρά. Παρεμβάλλεται ένα αμπερόμετρο αμελητέας αντίστασης και στα άκρα του συστήματος η τάση είναι 20V. Πόση είναι η τιμή της R_2 αν το αμπερόμετρο δείχνει 50mA;

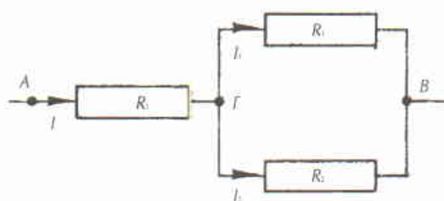
2.56. Τρεις αντιστάτες συνδέονται όπως στο σχήμα και στα άκρα του συστήματος εφαρμόζεται τάση 30V. Σας ζητούμε να υπολογίσετε την συνολικά καταναλισκόμενη ισχύ.



2.57. Διαθέτουμε όμοιους αντιστάτες των 10 Ω. Με ποιο τρόπο θα έπρεπε να συνδέσουμε ορισμένους απ' αυτούς ώστε να δημιουργήσουμε αντιστάτη α) 15Ω β) 32,5 Ω γ) 12Ω.

2.58. Διαθέτουμε τρεις αντιστάτες όμοιους (R), τους οποίους συνδέουμε με όλους τους δυνατούς τρόπους;. Ποια θα είναι η αντίσταση του συστήματος σε κάθε περίπτωση;

2.59. Τρεις αντιστάτες R_1 = 12Ω, R_2 = 6Ω, R_3 = 12Ω συνδέονται όπως στο σχήμα και αποτελούν το δίπολο (AB).
Υπολογίστε τα ρεύματα που διαρρέουν τους αντιστάτες καθώς και τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων Α και Γ, αν στο δίπολο εφαρμοστεί τάση V_1 = 12V.

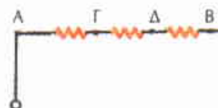


2.60. Μια ηλεκτρική θερμάστρα 600W/110V συνδέεται σε σειρά με ηλεκτρικό λαμπτήρα 52W/6V. Στο σύστημα εφαρμόζεται τάση 110V. Να εξετάσετε αν ο λαμπτήρας λειτουργεί κανονικά.



Ερωτήσεις και προβλήματα

2.61. Δύο γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταφέρουν την ίδια ισχύ στην ίδια απόσταση. Στη μία η μεταφορά γίνεται υπό τάση 200V ενώ στην άλλη γίνεται υπό τάση 10kV. Το πάχος των αγωγών μεταφοράς είναι τέτοιο ώστε οι λόγω του φαινομένου Joule απώλειες να είναι ίδιες και στις δύο γραμμές. Υπολογίστε τον λόγο που πρέπει να έχουν οι διάμετροι των αγωγών των δύο αυτών γραμμών.



2.62. Τρεις αντιστάτες $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$ και $R_3 = 30\Omega$ είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Βραχυκυκλώνουμε τα σημεία Α και Δ καθώς και τα Γ και Β.
Υπολογίστε την ισοδύναμη αντίσταση του διπόλου (ΑΒ).

2.63. Πρόκειται να δημιουργήσουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με συστοιχία η οποία έχει ηλεκτρεγερτική δυναμη 24V και εσωτερική αντίσταση 1Ω, τρεις αντιστάσεις $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 3\Omega$ $R_3 = 16\Omega$ σε σειρά και ένα αμπερόμετρο αμελητέας εσωτερικής αντίστασης. Σας ζητούμε να προβλέψετε α) την ένδειξη του αμπερομέτρου β) την τάση στα άκρα της R_3 γ) τη μεταβιβαζόμενη στην R_1 ηλεκτρική ισχύ και δ) την αύξηση της εσωτερικής θερμικής ενέργειας που συντελείται στην R_3 ανά δευτερόλεπτο.

2.64. Τα στοιχεία μιας γεννήτριας είναι $E = 6V$ και $r = 0,5\Omega$. Αν οι πόλοι της συνδεθούν αγώγιμα με τα άκρα αντιστάτη $R = 1,5\Omega$, υπολογίστε α) τον αριθμό των ηλεκτρονίων που διέρχονται από μια οποιαδήποτε διατομή σε χρόνο 10 δευτερολέπτων β) τη διαφορά δυναμικού στους πόλους της πηγής γ) την ενέργεια που καταναλίσκει ο αντιστάτης σε 10 δευτερόλεπτα.

2.65. Ένας αντιστάτης ($R = 12\ \Omega$) συνδέεται με ηλεκτρική στήλη. Θέλουμε η τάση στα άκρα του αντιστάτη να είναι 1,38 V. Ποιες τιμές πρέπει να έχει η ΗΕΔ και η εσωτερική αντίσταση της στήλης; Δίνεται ότι η ένταση του ρεύματος βραχυκυκλώσεως της στήλης είναι 1,5 A.

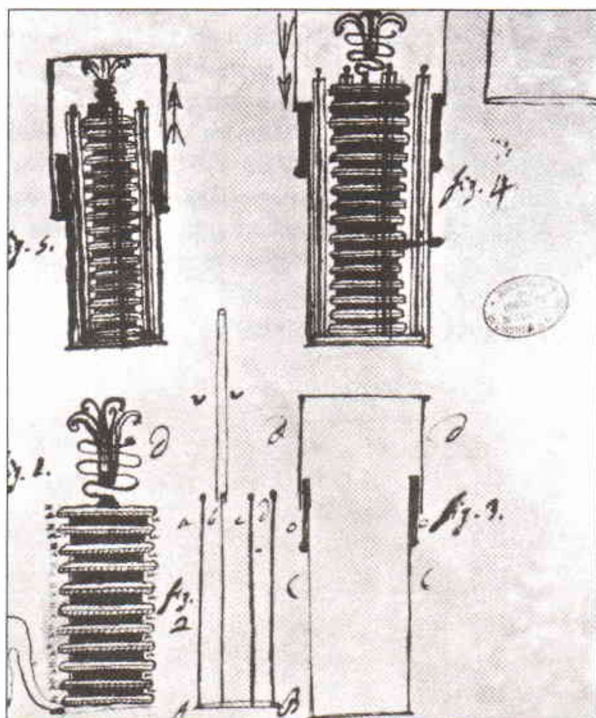
2.66. Τέσσερα όμοια ηλεκτρικά στοιχεία συνδέονται σε σειρά. Τρεις τέτοιες σειρές στοιχείων συνδέονται παράλληλα, οπότε και δημιουργείται μια συστοιχία δώδεκα όμοιων στοιχείων. Οι πόλοι της συστοιχίας συνδέονται με βολτόμετρο εσωτερικής αντίστασης 19Ω οπότε διαπιστώνεται ότι η τάση είναι 5,7V. Υπολογίστε την ΗΕΔ κάθε στοιχείου αν είναι γνωστό ότι οι εσωτερικές τους αντιστάσεις είναι 0,75Ω.



Η βολταϊκή στήλη

Το κανούριο που έφερνε η στήλη Volta, ήταν ασφαλώς η ικανότητά της να δίνει ηλεκτρικό ρεύμα, όπως και ο πυκνωτής (φιάλη Leyden) κάθε φορά που ενώνονταν με σύρμα τα δύο άκρα της. Σε σχέση, όμως, με τη φιάλη Leyden διέθετε σοβαρότατο πλεονέκτημα. Μετά την αγώγιμη σύνδεση των δύο άκρων της, η διαφορά δυναμικού δεν έδειχνε να εξαφανίζεται.

Σ' ένα γράμμα στον J. Banks, πρόεδρο της Βασιλικής Εταιρείας του Λονδίνου, ο ίδιος ο Volta γράφει:



20 Μάρτη 1800

«...Η συσκευή, για την οποία σας μιλάω, είναι αναμφίβολο ότι θα σας καταπλήξει. Είναι ένα σύστημα αγωγών που έχουν τοποθετηθεί κατά έναν ειδικό τρόπο. Είκοσι, σαράντα, εξήντα κομμάτια χαλκού (ή καλύτερα αργύρου), καθένα από τα οποία προσαρμόζεται σε ένα κομμάτι κασσιτέρου (ή καλύτερα ψευδαργύρου) και ανάμεσά τους στρώματα χαρτιού ή δέρματος, εμποτισμένα με αγώγιμο υγρό. Η νέα συσκευή μου μιμείται το αποτέλεσμα της φιάλης Leyden.

Σε ένα οριζόντιο τραπέζι τοποθετώ ένα μεταλλικό δίσκο και πάνω σ' αυτόν προσαρμόζω ένα δίσκο από ψευδάργυρο. Πάνω του βάζω ένα στρώμα εμποτισμένο με υγρό και αμέσως μετά ένα δίσκο από άργυρο, κι ύστερα έναν ακόμα δίσκο ψευδαργύρου, τον οποίο διαδέχεται ένα ακόμα εμποτισμένο στρώμα. Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο σχηματίζεται μια στήλη τόσο ψηλή, όσο να μπορεί να συγκρατείται χωρίς να πέφτει. Με καμιά εικοσαριά ζεύγη μετάλλων η στήλη είναι ικανή να προκαλεί τίναγμα σε όποιον αγγίζει τα δύο άκρα της με τα χέρια του...».

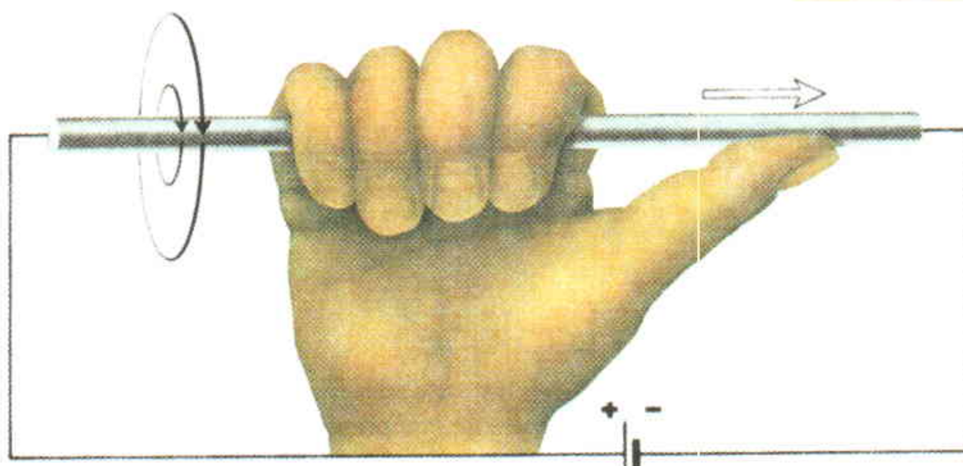
(Απόσπασμα)

Ντοκουμέντο



Η νέα συσκευή προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον στην επιστημονική κοινότητα της εποχής. Το Νοέμβριο του 1800 προσκαλεσμένος στο Παρίσι, ο Volta, εκτελεί πειράματα με την «εκπληκτική» στήλη του. Ο Ναπολέων παραγγέλνει να κατασκευαστεί μια μεγάλη συστοιχία (μπαταρία) από 600 στήλες, την οποία προσφέρει στην Ecole Polytechnique (Πολυτεχνική σχολή) του Παρισιού. Μια ακόμα ισχυρότερη συστοιχία κατασκευάζεται στο Λονδίνο από τη Royal Society (Βασιλική Εταιρεία). Οι συνέπειες διαδέχονται η μία την άλλη. Η έρευνα πάνω στο ηλεκτρικό ρεύμα αρχίζει να πυροδοτείται. Στην Αγγλία ο Humphry Davy (Χάμφρυ Ντέιβυ) θεμελιώνει την ηλεκτροχημεία, ενώ είκοσι περίπου χρόνια αργότερα ο Oersted φτάνει στο κρίσιμο πείραμα, με το οποίο αρχίζει η εποχή του ηλεκτρομαγνητισμού.

Μαγνητικές αλληλεπιδράσεις



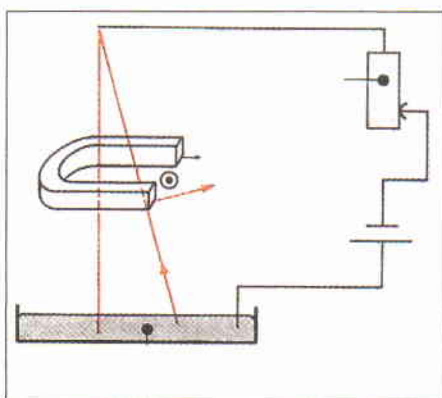
• **Επίδραση μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό** • Η δύναμη Laplace • Η επίδραση μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο πλαίσιο • Ηλεκτρικός κινητήρας • **Το ηλεκτρικό ρεύμα ως πηγή μαγνητικού πεδίου** • Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού • Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς • Η έννοια *μαγνητικό δίπολο* • **Ο μαγνητισμός και η δομή της ύλης** • Η κίνηση των ηλεκτρονίων πηγή του μαγνητισμού • Η θεωρία Weiss • **Το μαγνητικό πεδίο της Γης** • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

Σε προηγούμενο κεφάλαιο δόθηκε η ευκαιρία να μιλήσουμε για αλληλεπιδράσεις ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητών. Η έννοια *μαγνητικό πεδίο* μάς βοήθησε παρά πολύ κατά τις πρώτες περιγραφές αυτών των αλληλεπιδράσεων. Είπομε ότι από τη μια το μαγνητικό πεδίο επιδρά στους ρευματοφόρους αγωγούς ενώ από την άλλη το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί πεδίο μαγνητικό. Στο κεφάλαιο που αρχίζει θα επιδιώξουμε να εμβαθύνουμε λίγο περισσότερο στα δύο αυτά ζητήματα με το να αναζητήσουμε τους νόμους στους οποίους υπακούει η δράση και η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, του πεδίου, δηλαδή, για το οποίο το ηλεκτρικό ρεύμα, αποτελεί την πηγή αλλά και το υπόθεμα.

Επίδραση μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό

Η δύναμη Laplace

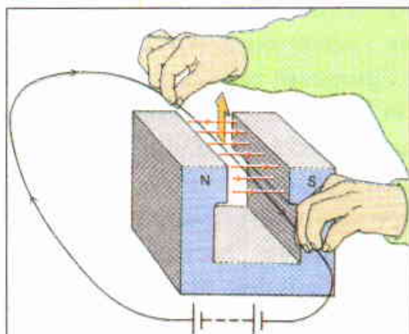
Τόσο τα ηλεκτρικά μοτέρ όσο και τα αμπερόμετρα με στρεφόμενο πλαίσιο λειτουργούν βάσει της επίδρασης μαγνήτη σε ρευματοφόρο αγωγό. Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναφερθήκαμε σ' αυτή την επίδραση και είπαμε ότι μπορούμε να την περιγράφουμε με τη βοήθειά της νευτωνικής έννοιας *δύναμη*. Στα παρακάτω θα μελετήσουμε την επίδραση αυτή διεξοδικά.



Στο εργαστήριο. Χρησιμοποιούμε ένα μαγνήτη πεταλοειδή. Ξέρουμε ότι στον χώρο που οριοθετείται από τους δύο πόλους του, το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές με φορά από τον βόρειο πόλο προς το νότιο. Ο ευθύγραμμος αγωγός είναι τμήμα ενός κυκλώματος με πηγή συνεχούς ρεύματος, ροοστάτη, αμπερόμετρο και αγώγιμο υγρό. Τοποθετούμε τον αγωγό σε θέση κατακόρυφη έτσι που ένα τμήμα του να βρίσκεται «μέσα» στο μαγνητικό πεδίο. Το άκρο του είναι βυθισμένο στο αγώγιμο υγρό

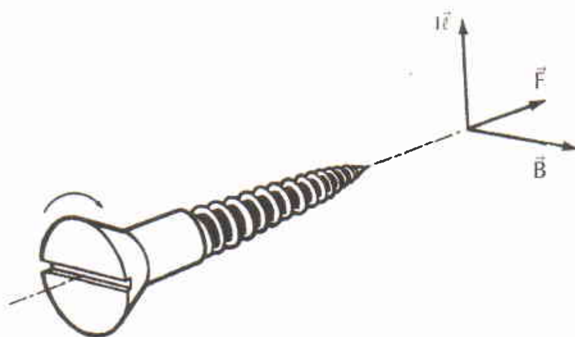
έτσι ώστε η ενδεχόμενη δράση κάποιας δύναμης να είναι δυνατόν να εκδηλωθεί. Κλείνουμε τον διακόπτη και βλέπουμε τον αγωγό να μετακινείται σε μια νέα θέση.

Η κατεύθυνση της μαγνητικής δύναμης Laplace. Ο τρόπος που μετακινήθηκε ο αγωγός προδίδει την κατεύθυνση της ασκούμενης δύναμης. Είναι μια κατεύθυνση ασυνήθιστη. Ο μαγνήτης εμφανίζεται να δρα – μέσω του πεδίου– στον αγωγό με κάποια δύναμη που δεν έχει ούτε τη διεύθυνση του πεδίου ούτε τη διεύθυνση του αγωγού. Η ασκούμενη δύναμη έχει διεύθυνση κάθετη *και* στον αγωγό *και* στην ένταση του πεδίου $\vec{B}$. Αν αναστρέψουμε τη φορά του μαγνητικού πεδίου διατηρώντας το ρεύμα αμετάβλητο, βλέπουμε ότι η φορά της δύναμης Laplace αναστρέφεται. Η αναστροφή διαπιστώνεται και στην περίπτωση που αναστρέψουμε τη φορά του ρεύματος διατηρώντας το μαγνήτη στην αρχική θέση του.



Το να περιγράψουμε τη φορά της δύναμης Laplace δεν είναι τόσο εύκολο. Αμέσως παρακάτω εκθέτουμε τρεις τεχνικές για την περιγραφή της και αφήνουμε στον αναγνώστη την επιλογή αυτής που θα ταιριάζει περισσότερο στη δική του σκέψη.

1. Η πρώτη απ' αυτές είναι ο λεγόμενος κανόνας του Maxwell. Για να τη χρησιμοποιήσουμε πρέπει εκτός από το διάνυσμα $\vec{B}$ να θεωρήσουμε και ένα διάνυσμα $I\vec{\ell}$ πάνω σε τμήμα μήκους ℓ του ρευματοφόρου αγωγού με φορά τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Σύμφωνα με τον κανόνα του Maxwell η φορά της δύναμης Laplace είναι η φορά κατά την οποία θα μετακινηθεί ο δεξιόστροφος κοχλίας (μια βίδα ή ένα ανοιχτήρι), τον οποίο φανταζόμαστε να στρέφεται κατά το συντομότερο τρόπο $I\vec{\ell}$ προς $\vec{B}$. Αν έχουμε καταπιαστεί με κατσαβίδια και με τιρμπουσόν είναι φυσικό να δείξουμε προτίμηση στον κανόνα Maxwell.







2. Η τεχνική της δεξιάς παλάμης μπορεί να μας φανεί περισσότερο κατανοητή. Φανταζόμαστε να τοποθετούμε τη δεξιά παλάμη, με τεντωμένο τον αντίχειρα, σε τρόπο ώστε τα τέσσερα δάχτυλα να είναι ομόρροπα προς τις δυναμικές γραμμές ενώ ο αντίχειρας ομόρροπος προς το ρεύμα. Η δύναμη Laplace κάθετη στο επίπεδο της παλάμης μας θα έχει φορά από την παλάμη μας προς το εσωτερικό της, όπως φαίνεται στο σχήμα.

3. Υπάρχει ακόμα ο κανόνας των τριών δαχτύλων του δεξιού χεριού. Μοιάζει αρκετά με τον προηγούμενο. Τεντώνουμε τον αντίχειρα, τον δείκτη και τον μέσο του δεξιού μας χεριού σε τρόπο ώστε να αντιστοιχούν σε ένα τρισορθογώνιο σύστημα αξόνων. Αν ο αντίχειρας αντιστοιχεί στη φορά του ρεύματος και ο δείκτης στη φορά του μαγνητικού πεδίου, ο μέσος θα μας δείχνει τη φορά της μαγνητικής δύναμης.

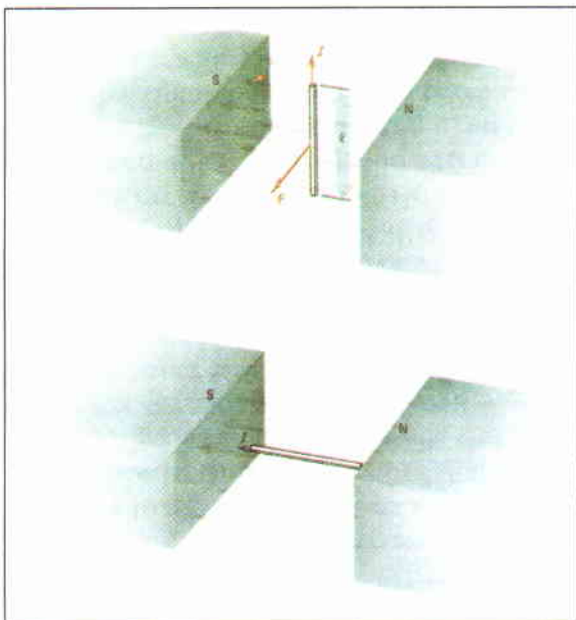
Το μέτρο της μαγνητικής δύναμης Laplace. Επιστρέφουμε τώρα στην πειραματική διάταξη για να ερευνήσουμε τι ακριβώς συμβαίνει με το μέτρο της δύναμης Laplace.

Το ερώτημα είναι: *από ποιους παράγοντες καθορίζεται το μέτρο της δύναμης Laplace; Εξαρτάται από τη φύση του αγωγού; από το μήκος του αγωγού; από το βάρος του αγωγού; Εξαρτάται από την ένταση του ρεύματος; Και ποια μορφή έχει η σχετική εξάρτηση;* Αναφερόμαστε βέβαια στην ειδική περίπτωση που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι ευθύγραμμος.

Τις απαντήσεις στα παραπάνω ερωτήματα μάς τις δίνουν οι πειραματικές έρευνες αρκεί σε κάθε μία από αυτές να θέτουμε ένα και μόνο συγκεκριμένο ερώτημα. Οι απαντήσεις τις οποίες παίρνουμε συνοψίζονται στα εξής:

α) Για την περίπτωση που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου το μέτρο της δύναμης Laplace δίνεται από την εξίσωση

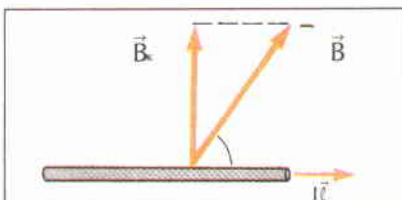
$$\mathbf{F = BI}\,\ell$$



στην οποία το Β παριστάνει την ένταση του μαγνητικού πεδίου, το Ι την ένταση του ρεύματος και το ℓ το μήκος του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού.

β) Για την περίπτωση που ο ρευματοφόρος αγωγός είναι παράλληλος με τις δυναμικές γραμμές δεν ασκείται μαγνητική δύναμη. Στο γενικό, δηλαδή, φαινόμενο της επίδρασης μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό παρουσιάζεται μία εξαίρεση.

Αν, τέλος, συνδυάσουμε τα πειραματικά αυτά δεδομένα με τη θεωρία για την ανάλυση ενός διανύσματος θα οδηγηθούμε σε μία γενικότερη εξίσωση.



Πάνω στο επίπεδο που ορίζει με το $I\vec{\ell}$ αναλύουμε το διάνυσμα $\vec{B}$ σε δύο συνιστώσες $\vec{B}_π$ και $\vec{B}_κ$ από τις οποίες η μία $\vec{B}_π$ να είναι παράλληλη προς τον ευθύγραμμο αγωγό και η άλλη $\vec{B}_κ$ ($B_κ$ = Bημφ) κάθετη σ' αυτόν. Σύμφωνα με όσα είπαμε, το μαγνητικό πεδίο $\vec{B}_π$ δεν επιδρά στον ρευματοφόρο αγωγό. Η επίδραση, συνεπώς του $\vec{B}$ προέρχεται μόνο από το πεδίο $\vec{B}_κ$. Ισχύει, λοιπόν $F = B_κ I\ell$ ή **F = BIℓημφ.**

Ένταση μαγνητικού πεδίου

Είναι γνωστό ότι κάθε μικρή βελόνα μέσα στο μαγνητικό πεδίο προσανατολίζεται κατά την κατεύθυνση της έντασης. Στο πρώτο, επίσης, κεφάλαιο δεχθήκαμε για την ένταση του μαγνητικού πεδίου έναν ορισμό –B = F/m – βασιζόμενο στην υποθετική *μαγνητική ποσότητα*. Αλλά η έννοια μαγνητική ποσότητα έχει εγκαταλειφθεί. Ως υπόθεμα για το μαγνητικό πεδίο μπορούμε να θεωρούμε τον ρευματοφόρο αγωγό και να δώσουμε έναν ορισμό του μεγέθους *ένταση μαγνητικού πεδίου* βασιζόμενο στη δύναμη Laplace.

Εξυπακούεται ότι ο ορισμός αυτός συμπεριλαμβάνει τους ορισμούς όλων των στοιχείων, που καθορίζουν ένα διανυσματικό μέγεθος, δηλαδή της διεύθυνσης, της φοράς και του μέτρου.

Διεύθυνση. Σε κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου αντιστοιχεί, όπως είπαμε, μία και μόνο ορισμένη διεύθυνση, τέτοια ώστε η δύναμη σε οποιοδήποτε ρευματοφόρο αγωγό να είναι μηδενική. Η χαρακτηριστική και μοναδική αυτή διεύθυνση θα ονομάζεται διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο αυτό. Ο ορισμός φαίνεται αυθαίρετος. Ας μη μας διαφεύγει, όμως, ότι κατ' αυτήν την διεύθυνση προσανατολίζεται κάθε μικρή μαγνητική βελόνα που θα τοποθετήσουμε στο μαγνητικό πεδίο στο οποίο αναφερόμαστε.

Φορά. Πάνω στη διεύθυνση που ορίσαμε αντιστοιχούν δύο αντίθετες φορές. Η μία από αυτές ορίζεται ως φορά της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Είναι αυτή που ανταποκρίνεται στην κατεύθυνση της δύναμης Laplace βάσει του κανόνα του Maxwell.

Μέτρο. Σε μήκος ℓ ενός ευθύγραμμου ρευματοφόρου (Ι) αγωγού ο οποίος βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο κάθετα στη διεύθυνση που ορίστηκε προηγουμένως ασκείται δύναμη F. Το πηλίκο $F/I\ell$ ι) αποτελεί ποσότητα ανεξάρτητη από τη μαγνητική δύναμη και το υπόθεμα και ιι) εκφράζει τη συμβολή του πεδίου στη διαμόρφωση του μαγνητικού πεδίου.

Το πηλίκο αυτό $F/I\ell$ ονομάζεται μέτρο της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Από την ίδια εξίσωση ορίζεται και η μονάδα έντασης 1 Tesla (1T). Είναι ίση με 1N/Am.

Επίδραση μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο πλαίσιο

Ήδη από το 1820 ο Ampère είχε διακρίνει την ομοιότητα. Η συμπεριφορά ενός ρευματοφόρου πλαισίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο παρουσιάζει κάποια –όχι εμφανή είναι αλήθεια– ομοιότητα με τη γνωστή συμπεριφορά μιας μαγνητικής βελόνας μέσα στο πεδίο αυτό.

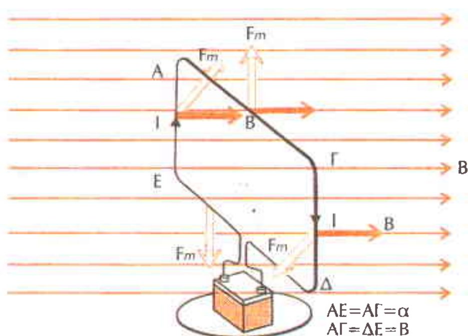
Παρατηρήσεις και συμπεράσματα. Το πλαίσιο που θα χρησιμοποιήσουμε θα έχει σχήμα ορθογώνιο. Το δένουμε με ένα λεπτό νήμα και το κρεμάμε σε περιοχή ομογενούς μαγνητικού πεδίου, έτσι που να μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα συμμετρίας του. Κάτω από την επίδραση του βάρους και της δύναμης του τεντωμένου νήματος το πλαίσιο ισορροπεί. Όταν το ρευματοδοτήσουμε διαπιστώνουμε ότι εκτελεί στροφικές ταλαντώσεις γύρω από τον άξονα ανάρτησης ενώ ταυτόχρονα τείνει να προσανατολιστεί με το επίπεδό του κάθετο στις δυναμικές γραμμές. Τελικά στη θέση αυτή ισορροπεί.

Στον ηλεκτρομαγνητισμό με τον όρο *ρευματοφόρο πλαίσιο* δεν εννοούμε υποχρεωτικά κάτι που έχει σχήμα ορθογώνιο. Αυτό που εννοούμε έχει, βέβαια, σχήμα επίπεδο και δημιουργείται από ένα ρευματοφόρο καλώδιο που ανήκει σε κλειστό κύκλωμα (βρόχο) με τα σημεία «εισόδου» και «εξόδου» του ρεύματος πολύ κοντά το ένα στο άλλο.

Η συνολική συμπεριφορά μάς φέρνει στο μυαλό τη συμπεριφορά μιας μαγνητικής βελόνας μέσα σε μαγνητικό πεδίο ομογενές. Η ελκυστική αυτή αναλογία μας προτρέπει να δεχτούμε ότι:

Οι δύο όψεις του πλαισίου συμπεριφέρονται σαν πόλοι μαγνητικής βελόνας, βόρειος και νότιος.

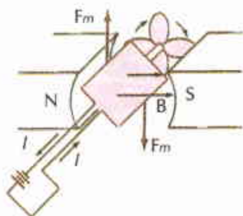
Θεωρητική μελέτη. Υποθέτουμε ότι ένα αρχικά ακίνητο πλαίσιο ΑΓΔΕ είναι παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές ομογενούς πεδίου και ότι σε κάποια στιγμή το ρευματοδοτούμε.



Το πλαίσιο αποτελείται από τέσσερις ευθύγραμμους αγωγούς. Σε καθέναν από αυτούς ασκείται –από το μαγνητικό πεδίο– μια δύναμη Laplace. Οι δυνάμεις που ασκούνται στους δύο οριζόντιους αγωγούς (στο σχήμα είναι ο ΑΓ και ΔΕ) είναι αντίθετες και αλληλοεξουδετερώνονται. Οι δύο δυνάμεις που ασκούνται στους κατακόρυφους αγωγούς έχουν μεν ίσα μέτρα αλλά δεν αλληλοεξουδετερώνονται. Είναι παράλληλες δυνάμεις με αντίθετες φορές, οι οποίες τείνουν να περιστρέψουν το αρχικά ακίνητο πλαίσιο. Σε περίπτωση, όμως, που το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές, οι δυνάμεις στους κατακόρυφους αγωγούς γίνονται αντίθετες και αλληλοεξουδετερώνονται.

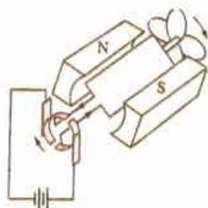
Ηλεκτρικός κινητήρας

Όταν το μεταλλικό πλαίσιο ρευματοδοτηθεί, κάτω από την επίδραση του μαγνητικού πεδίου αρχίζει να στρέφεται. Έχουμε, δηλαδή, μία διάταξη που αποτελεί ενεργειακό μετατροπέα. Η μεταβιβαζόμενη ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται (κατά ένα μέρος) σε ενέργεια μηχανική. Έχουμε, μ' άλλα λόγια, μια μηχανή. Αν στον άξονα περιστροφής προσαρμόσουμε έναν έλικα και θελήσουμε να τον βάλουμε σε περιστροφή, αν, δηλαδή, θελήσουμε να δημιουργήσουμε έναν ηλεκτρικό κινητήρα θα αντιμετωπίσουμε ένα σοβαρό εμπόδιο. Έπρεπε να το περιμένουμε. Η κίνηση του πλαισίου είναι, βέ-

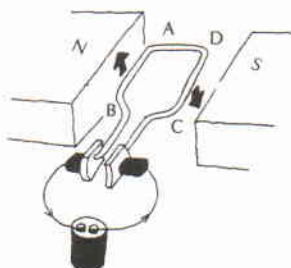


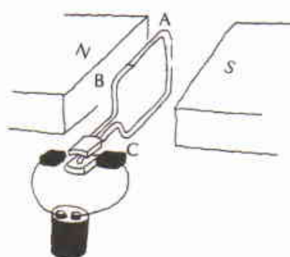
βαια, περιστροφική αλλά με φορά η οποία αναστρέφεται.

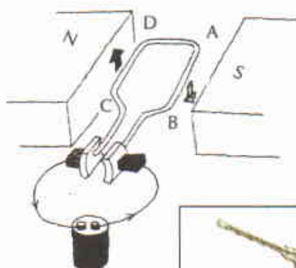
Ας υποθέσουμε ότι κατά τη στιγμή που το ρευματοδοτούμε, το πλαίσιο είναι παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές. Οι ασκούμενες δυνάμεις Laplace το επιταχύνουν. Αυτό όμως, συμβαίνει μέχρις ότου γίνει κάθετο στις δυναμικές γραμμές διότι από τη στιγμή εκείνη οι δυνάμεις Laplace δρουν επιβραδυντικά. Είναι το εμπόδιο για το οποίο μιλήσαμε.



Στο σημείο αυτό οι τεχνικοί του περασμένου αιώνα έπαιξαν το ρόλο τους και μας έδωσαν τον πρώτο ηλεκτρικό κινητήρα. Η ιδέα είναι φαινομενικά απλή. Τη στιγμή που το πλαίσιο βρίσκεται στη θέση ισορροπίας, ένα κατάλληλο σύστημα που λέγεται *συλλέκτης* λειτουργεί έτσι ώστε να αναστρέφει τη φορά του ρεύματος. Η συνέπεια είναι να εμφανίζονται δυνάμεις Laplace τέτοιες ώστε να λειτουργούν επιταχυντικά. Όταν το πλαίσιο στη συνέχεια βρεθεί και πάλι κάθετο στις δυναμικές γραμμές το ρεύμα και πάλι αναστρέφεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερή φορά της περιστροφικής του κίνησης.



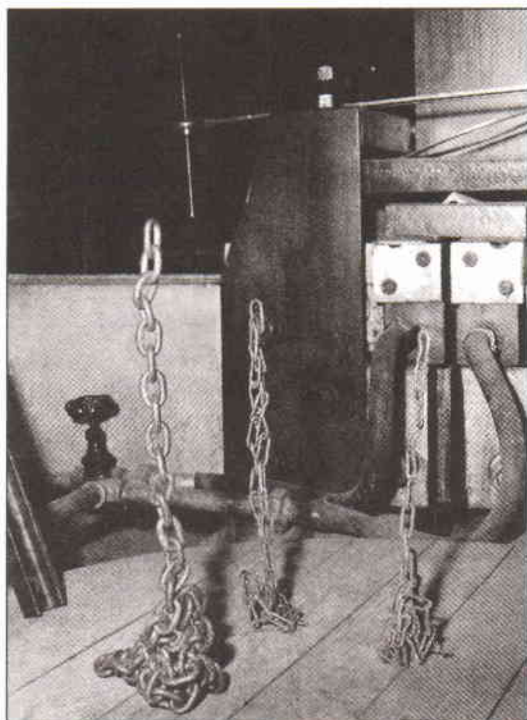




Στη «μίζα» που χρησιμοποιούμε για να «πάρει μπρος» το αυτοκίνητο ή η μοτοσικλέτα μας, στον ηλεκτρικό σιδηρόδρομο Πειραιά-Κηφισιάς, στα τρόλεϊ, στο ηλεκτρικό πλυντήριο, στο μίξερ, στους τόρνους, αλλά και σ' ένα σωρό παιχνίδια που παίξαμε όταν είμαστε παιδιά, υπάρχει ένας κινητήρας ηλεκτρικός. Όλοι οι ηλεκτρικοί αυτοί κινητήρες είναι απόγονοι των κινητήρων που κατασκεύασαν τον περασμένο αιώνα οι Ευρωπαίοι τεχνικοί. Στα 1832 ο Pixii, ένας Γάλλος κατασκευαστής, που βοήθησε πολύ τον Ampère, έλυσε τα πρώτα προβλήματα που αναφέραμε. Οι πρώτοι, όμως, οικονομικοί κινητήρες καθυστέρησαν. Για πολλές ακόμα δεκαετίες τα προβλήματα που είχαν να αντιμετωπίσουν οι τεχνικοί αποδείχτηκαν μεγαλύτερα από εκείνα που είχαν να αντιμετωπίσουν οι επιστήμονες.



Το ηλεκτρικό ρεύμα ως πηγή μαγνητικού πεδίου

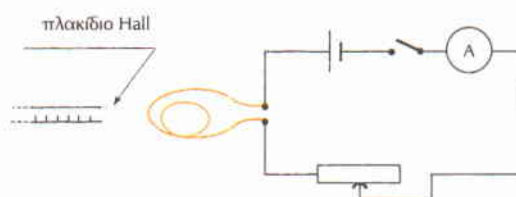


Ένα ισχυρό ηλεκτρικό ρεύμα 30.000 Αμπέρ δημιουργεί μαγνητικό πεδίο ικανό να σηκώνει βαριές αλυσίδες και να τις διατηρεί κατακόρυφες

Στην προηγούμενη ενότητα ερευνήσαμε την επίδραση ενός μαγνητικού πεδίου σε ρευματοφόρο αγωγό. Στην ενότητα που ακολουθεί θα αντιμετωπίσουμε το ηλεκτρικό ρεύμα ως πηγή μαγνητικού πεδίου.

Η σχετική έρευνα απαιτεί μαγνητικές βελόνες, σιδηρορινίσματα και κατάλληλα συναρμολογημένο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Ρευματοδοτούμε έναν τυχαίου σχήματος, μεταλλικό αγωγό. Στο κύκλωμα υπάρχει διακόπτης, αμπερόμετρο, ροοστάτης και γεννήτρια.



Από τη στιγμή που κλείνουμε τον διακόπτη η συμπεριφορά μιας ευαίσθητης μαγνητικής βελόνας, που βρίσκεται κοντά στον αγωγό, μας «λέει» ότι δημιουργήθηκε μαγνητικό πεδίο.

Το μήνυμα είναι παρόμοιο με αυτό που μας έστειλε το 1820 το πείραμα Oersted. *Το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.*

Κάθε απόπειρα περιγραφής του μαγνητικού πεδίου οφείλει να δίνει απαντήσεις σε δύο ερωτήματα.

Το πρώτο. Από τι εξαρτάται η ένταση του μαγνητικού πεδίου;

Το δεύτερο. Ποια είναι η εικόνα των δυναμικών γραμμών;

Η εργαστηριακή έρευνα αποδεικνύει ότι σχετικά με το *πρώτο* ερώτημα ισχύει

α. Η ένταση (B) σ' ένα σημείο του πεδίου αυτού εξαρτάται

ι) από τη θέση του σημείου και

ii) από τη *γεωμετρία* του αγωγού.

β. Για ένα ορισμένο σημείο του πεδίου το μέτρο της έντασης είναι ανάλογο προς την ένταση του ρεύματος.

Η απαιτούμενη εργαστηριακή έρευνα είναι οπωσδήποτε πιο αποτελεσματική αν διαθέτουμε ένα σύγχρονο μαγνητόμετρο με πλακίδιο Hall (Χολ). Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο Hall σύμφωνα με το οποίο η επίδραση μαγνητικού πεδίου σε ειδικό ρευματοφόρο πλακίδιο έχει ως συνέπεια την εμφάνιση διαφοράς δυναμικού. Το φαινόμενο ανακάλυψε ο Αμερικανός E.H. Hall και σήμερα γνωρίζουμε ότι εκδηλώνεται σε μέταλλα αλλά πολύ πιο έντονα σε ημιαγωγούς.

Το όργανο αποτελείται από λεπτό αγώγιμο πλακίδιο το οποίο ρευματοδοτείται από ξεχωριστό κύκλωμα. Ένα ευαίσθητο βολτόμετρο μετρά την εμφανιζόμενη διαφορά δυναμικού η οποία είναι ανάλογη προς την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Το βολτόμετρο είναι απευθείας βαθμολογημένο σε Tesla. Τα μαγνητόμετρα αυτού του τύπου μπορούν να ανιχνεύουν μαγνητικά πεδία μέχρι και 10^{-4} T, ενώ με τη βοήθειά τους μπορούμε να προσδιορίσουμε και την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Όσο για την απάντηση στο *δεύτερο* ερώτημα οι ενδείξεις μάς οδηγούν στο ότι η εικόνα των δυναμικών γραμμών σχετίζεται με τη *γεωμετρία* του ρευματοφόρου αγωγού.

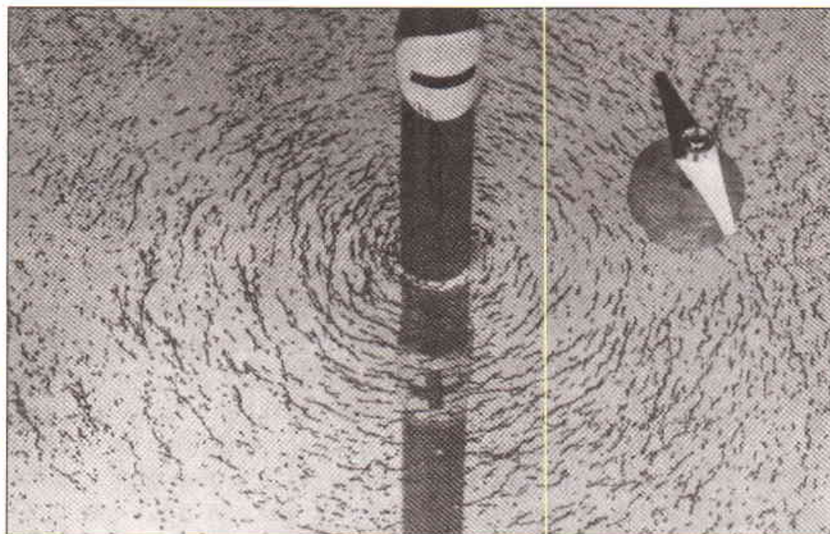
Αμέσως παρακάτω θα επιχειρήσουμε να ερευνήσουμε παραπέρα το όλο ζήτημα. Για να το πετύχουμε θα καταπιαστούμε με τη μελέτη μαγνητικών πεδίων, τα οποία δημιουργούνται από αγωγούς, με απλά σχήματα. Θα αρχίσουμε με αγωγό το σχήμα του οποίου μας επιτρέπει να τον χαρακτηρίζουμε *ευθύγραμμο*.

Μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού

Συναρμολογούμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα παρόμοιο με αυτό που περιγράψαμε προηγουμένως στο οποίο τώρα συμμετέχει ένας αγωγός ευθύγραμμος. Μελετάμε το μαγνητικό πεδίο το οποίο δημιουργείται από αυτόν. Η μελέτη περιορίζεται σε σημεία που βρίσκονται κοντά στον αγωγό, σε σημεία, δηλαδή, η απόσταση των οποίων από τον αγωγό –συγκρινόμενη με το μήκος του– είναι ασήμαντη*.

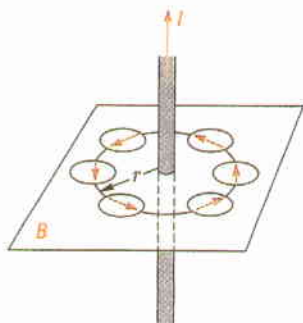
---

* Μπορούμε, μ' άλλα λόγια, να πούμε ότι (σε σχέση με τις αποστάσεις των σημείων αυτών) ο αγωγός έχει πολύ μεγάλο μήκος. Σ' αυτή τη σύγκριση βασίζεται και η διατύπωση *μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού άπειρου μήκους*.



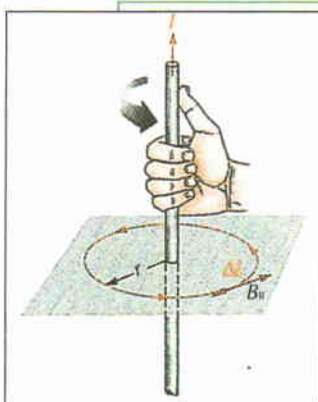
Τοπογραφία. Αν χρησιμοποιήσουμε σιδηρορινίσματα θα δημιουργήσουμε τη γνωστή εικόνα με τις δυναμικές γραμμές. Ένας βολικός τρόπος για να το πετύχουμε είναι να τοποθετήσουμε τον αγωγό σε θέση κατακόρυφη και να χρησιμοποιήσουμε ένα κομμάτι χαρτόνι, στο οποίο θα έχουμε ανοίξει μια τρύπα για να περνάει μέσα απ' αυτήν ο αγωγός. Βάζουμε το χαρτόνι σε θέση οριζόντια, ρίχνουμε πάνω του τα σιδηρορινίσματα και κλείνουμε το κύκλωμα. Αν το ρεύμα έχει μια τιμή γύρω στα 10 Αμπέρ τα ρινίσματα θα διαταχθούν και θα μας δίνουν την εικόνα των δυναμικών γραμμών. Παρατηρούμε ότι οι δυναμικές γραμμές είναι κύκλοι ομόκεντροι, το επίπεδο των οποίων είναι κάθετο στον ευθύγραμμο αγωγό.

Η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$. Είναι γνωστό ότι το διάνυσμα της έντασης είναι εφαπτόμενο στις δυναμικές γραμμές. Σε γλώσσα γεωμετρική αυτό σημαίνει ότι η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου είναι ασύμβατα κάθετη στην ευθεία που καθορίζει ο ρευματοφόρος αγωγός.



Η φορά του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$. Η έρευνα για τον προσδιορισμό της φοράς του $\vec{B}$ δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τα σιδηρορινίσματα.

Χρειαζόμαστε ένα μαγνητικό δίπολο στο οποίο να μπορούμε να αναγνωρίζουμε τις θέσεις των δύο πόλων του. Η μαγνητική βελόνα προσφέρεται. Η θέση ευσταθούς ισορροπίας μιας μικρής βελόνας εκτός από τη διεύθυνση του $\vec{B}$ μάς αποκαλύπτει και τη φορά του. Η φορά αυτή είναι η φορά κατά την οποία στρέφεται ένας δεξιόστροφος κοχλίας καθώς μετακινείται κατά τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος.



Κανόνας του δεξιού χεριού. Μέσα από το σχήμα γίνεται κατανοητός ένας ακόμα κανόνας για να βρίσκουμε τη φορά του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$ το οποίο δημιουργεί ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός.

Μέτρο Β της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Για να προσδιορίσουμε το μέτρο (Β) της έντασης στα διάφορα σημεία του μαγνητικού πεδίου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια μικρή μαγνητική βελόνα. Αν την τοποθετήσουμε σε ένα ορισμένο σημείο (περιοχή) η βελόνα θα εκτελέσει ταλαντώσεις η περίοδος των οποίων θα μας οδηγήσει σ' αυτό που ζητάμε να υπολογίσουμε. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά τον Οκτώβριο του 1820 κατά τη συνεργασία των Γάλλων φυσικών Biot και Savart και τους οδήγησε σε ένα θεωρητικό νόμο για το μαγνητικό πεδίο του ηλεκτρικού ρεύματος.

Πιο σύγχρονη και οπωσδήποτε πιο αποτελεσματική είναι η μέθοδος με το πλακίδιο Hall. Διατηρούμε το ρεύμα, τοποθετούμε το πλακίδιο σε διάφορες αποστάσεις (r) από τον ρευματοφόρο αγωγό και καταγράφουμε τα συμπεράσματα.

Φροντίζουμε οι αποστάσεις να είναι μικρές σε σχέση με το μήκος του αγωγού. Διαπιστώνουμε ότι η ένταση (Β) του μαγνητικού πεδίου σ' ένα σημείο είναι αντίστροφα ανάλογη προς την απόσταση (r) του σημείου από τον αγωγό. Θυμίζουμε εδώ και το γενικό συμπέρασμα που αφορά το μαγνητικό πεδίο όλων των ρευματοφόρων αγωγών, σύμφωνα με το οποίο η ένταση του μαγνητικού πεδίου σ' ένα σημείο είναι ανάλογη προς την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.

Η εξίσωση. Τα δύο συμπεράσματα μπορούν να συμπεριληφθούν στην εξίσωση.

$$\mathbf{B = k_{\mu} \frac{2I}{r}}$$

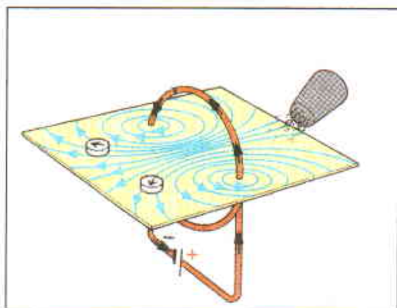
η οποία μας δίνει το μέτρο (Β) της έντασης μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από ευθύγραμμο ρευματοφόρο (Ι) αγωγό, σε απόσταση r από τον αγωγό. Ισχύει εφόσον η απόσταση r είναι μικρή σε σχέση με το μήκος του ρευματοφόρου αγωγού. Η σταθερά k_{μ} είναι ίση με 10^{-7}N/A^2.

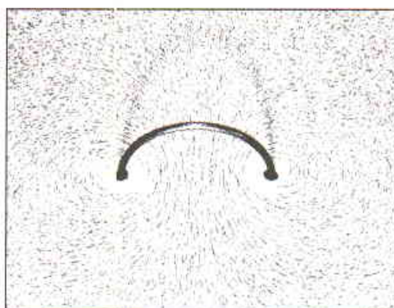
Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός είναι σχετικά ασθενές. Αν ρευματοδοτήσουμε ένα καλώδιο μήκους 50 cm με ρεύμα 10 Αμπέρ, το μαγνητικό πεδίο, σε απόσταση 2 εκατοστών απ' αυτό, θα έχει μέτρο μόλις 10^{-4} Tesla, θα είναι δηλαδή λίγες μόνο φορές ισχυρότερο από το μαγνητικό πεδίο της Γης. Αν όμως τυλίξουμε το ίδιο καλώδιο ώστε να δημιουργήσουμε κυκλικές σπείρες τα πράγματα αλλάζουν. Η αλλαγή στη γεωμετρία του σύρματος θα έχει ως συνέπεια το μαγνητικό πεδίο του «ίδιου» σύρματος να γίνει πολύ ισχυρότερο. Η παρατήρηση αυτή, η οποία επιβεβαιώνεται και από τη θεωρητική έρευνα, αποτελεί έναν από τους λόγους για τους οποίους έχει δημιουργηθεί μια «προτίμηση» της επιστήμης και της τεχνολογίας στους κυκλικούς ρευματοφόρους αγωγούς. Ένα σύνολο τέτοιων αγωγών αποτελεί το λεγόμενο **πηνίο.**

Κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός. Με τον κυκλικό ρευματοφόρο αγωγό ασχοληθήκαμε στην προηγούμενη ενότητα. Τον μελετήσαμε από την άποψη της επίδρασης την οποία υφίσταται από ένα μαγνητικό πεδίο.

Ας καταπιαστούμε τώρα με τον ίδιο αγωγό θεωρώντας τον, όμως, πηγή μαγνητικού πεδίου. Με τη βοήθεια ρινισμάτων σιδήρου μπορούμε το μαγνητικό αυτό πεδίο να το εικονογραφήσουμε. Διαπιστώνουμε ότι η μορφή του θυμίζει το πεδίο ενός μικρού ευθύγραμμου μαγνήτη.





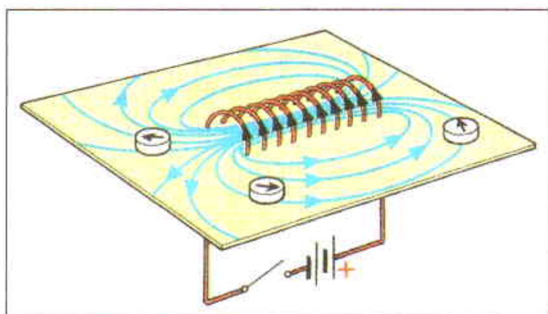
Σωληνοειδές. Η παραπάνω ιδιαιτερότητα αξιοποιείται ακόμα καλύτερα με το λεγόμενο σωληνοειδές, το όνομα του οποίου σχετίζεται με τη μορφή του. Είναι ένα σύνολο από παράλληλα κυκλικά ρεύματα, το οποίο παρουσιάζει την εικόνα ενός σωλήνα με διάμετρο πολύ μικρή σε σχέση προς το μήκος του. Στην πράξη μπορούμε να φτιάξουμε μια τέτοια διάταξη τυλίγοντας σφιχτά ένα σύρμα γύρω από μονωτικό κύλινδρο και δημιουργώντας έτσι σπείρες, οι οποίες φροντίζουμε να ισαπέχουν.

Τοπογραφία. Αν το ρευματοδοτήσουμε, η εικόνα που θα μας δώσουν τα σιδηρορινίσματα μας επιτρέπει να διατυπώσουμε τα παρακάτω συμπεράσματα.

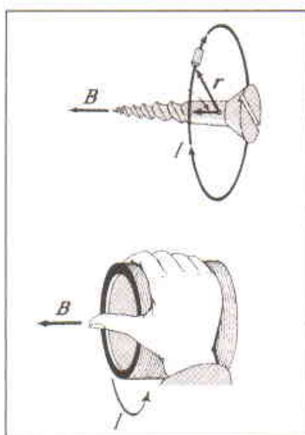
1. Στο εξωτερικό του σωληνοειδούς, η τοπογραφία του πεδίου μάς φέρνει στο μυαλό το μαγνητικό πεδίο ενός μαγνήτη ραβδόμορφου.

2. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς τα σιδηρορινίσματα διατάσσονται σε γραμμές παράλληλες και ισαπέχουσες. Η εικόνα που παρουσιάζουν (μαγνητικό φάσμα) μας δίνει το δικαίωμα να ισχυριστούμε ότι στην περιοχή αυτή το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές. Και είναι αλήθεια ότι, όπως ακριβώς ο επίπεδος πυκνωτής προσφέρεται για τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου ομογενούς, για την παραγωγή ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου μια πολύ καλή λύση είναι το ρευματοφόρο σωληνοειδές.

3. Όπως και στο μαγνητικό πεδίο του ευθύγραμμου αγωγού οι δυναμικές γραμμές είναι και εδώ κλειστές. Κάθε μια από αυτές εξέρχεται από το ένα άκρο και εισέρχεται στο εσωτερικό του σωληνοειδούς από το άλλο άκρο του.

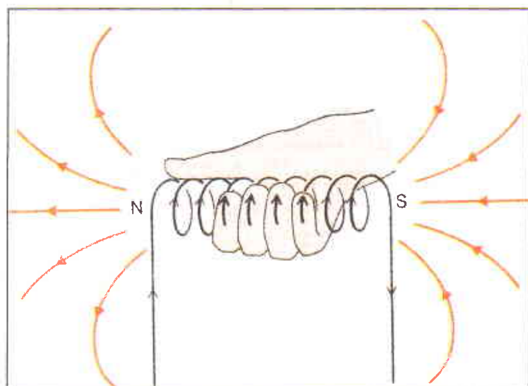


Κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε σημείο του χώρου η διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου καθορίζεται από την εφαπτόμενη στις δυναμικές γραμμές που περνάει από το σημείο αυτό. Ειδικά στο εσωτερικό του σωληνοειδούς η διεύθυνση του πεδίου είναι κάθετη στα παράλληλα μεταξύ τους επίπεδα των σπειρών. Είναι μ' άλλα λόγια παράλληλη προς τον λεγόμενο άξονα του σωληνοειδούς.



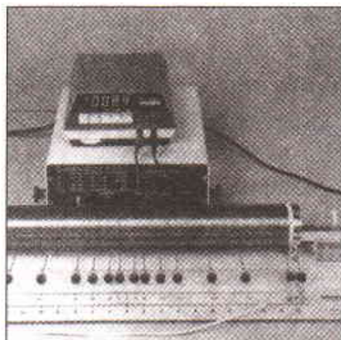
Για να προσδιοριστεί η φορά του μαγνητικού πεδίου δεν επαρκεί η εικόνα με τα σιδηρορινίσματα. Με τη βοήθεια μιας μαγνητικής βελόνας διαπιστώνουμε ότι το μαγνητικό πεδίο έχει μια ορισμένη φορά, η οποία εξαρτάται, όπως ξέρουμε, από τη φορά του ρεύματος που διαρρέει το σωληνοειδές. Για να την περιγράψουμε θα χρησιμοποιήσουμε, για μια ακόμα φορά, τον κανόνα του Maxwell. Είναι πιο βολικό το να περιγράψουμε τη φορά του πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς. Θεωρούμε μια ορισμένη σπείρα, η οποία διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα ορισμένης φοράς. Αν φανταστούμε ένα δεξιόστροφο κοχλία να βρίσκεται στη θέση της και να στρέφεται κατά τη φορά του ρεύματος, η συνεπαγόμενη μετακίνησή του θα γίνεται κάθετα στο επίπεδο της σπείρας (κατά

τη διεύθυνση δηλαδή του μαγνητικού πεδίου) αλλά και κατά ορισμένη φορά. Η φορά αυτή συμπίπτει με τη φορά του μαγνητικού πεδίου.



Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς το πεδίο είναι, όπως είπαμε, ομογενές. Χαρακτηρίζεται από ένταση ($\vec{B}$) με κοινό μέτρο και κοινή κατεύθυνση για όλα τα σημεία του. Στην κατεύθυνση ήδη αναφερθήκαμε. Ας δούμε τι συμβαίνει και με το μέτρο της έντασης.

Μας είναι κατ' αρχήν γνωστό ότι η ένταση είναι ανάλογη προς το ρεύμα που διαρρέει το σωληνοειδές. Απομένει να μελετήσουμε την επίδραση των άλλων στοιχείων στη διαμόρφωση της τιμής της. Το μήκος (ℓ) και ο αριθμός (n) των σπειρών αποτελούν τα βασικά στοιχεία ενός σωληνοειδούς.



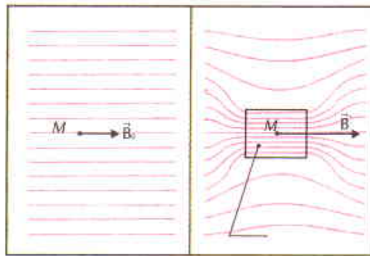
Προσφεύγουμε στο πείραμα. Τροφοδοτούμε το πηνίο με το ίδιο ρεύμα σε κάθε περίπτωση. Τα μηνύματα που παίρνουμε μας οδηγούν στα παρακάτω δύο συμπεράσματα:

α. Για πηνίο ορισμένου αριθμού σπειρών (n) η ένταση (B) του μαγνητικού πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το μήκος του (ℓ).

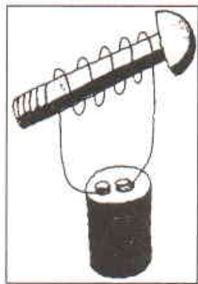
β. Για πηνίο ορισμένου μήκους η ένταση του μαγνητικού πεδίου είναι ανάλογη προς τον αριθμό των σπειρών. Τα δύο αυτά συμπεράσματα και η γνωστή αναλογία έντασης μαγνητικού πεδίου και έντασης ηλεκτρικού ρεύματος συνοψίζονται στην παρακάτω εξίσωση

$$\mathbf{B = 4\pi k_{\mu} I \frac{n}{\ell}}$$

Μαγνητική διαπερατότητα. Αν στο εσωτερικό του ρευματοφόρου σωληνοειδούς βάλουμε ένα κομμάτι μαλακό σίδηρο θα διαπιστώσουμε ότι **α. ο σίδηρος θα μαγνητιστεί**, ενώ ταυτόχρονα **β. το μαγνητικό φάσμα θα αλλοιωθεί.** Η εικόνα των δυναμικών γραμμών θα τις εμφανίζει σαν να «προσπαθούν» να περάσουν μέσα από το σίδηρο όσο το δυνατόν περισσότερες. Στα άκρα του σιδερένιου κομματιού θα δημιουργηθεί μια πύκνωση των γραμμών, μήνυμα ότι η ένταση του πεδίου αυξήθηκε.



Οι μετρήσεις δείχνουν ότι για τη νέα τιμή (B′) της έντασης ισχύει $B' = \mu B_0$. Με το γράμμα «μ» συμβολίζεται η λεγόμενη **μαγνητική διαπερατότητα** του υλικού, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση είναι ο σίδηρος. Η μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου είναι ένας καθαρός αριθμός πολύ μεγαλύτερος από τη μονάδα, η τιμή του οποίου εξαρτάται από το αρχικό μέτρο (B_0) της έντασης.



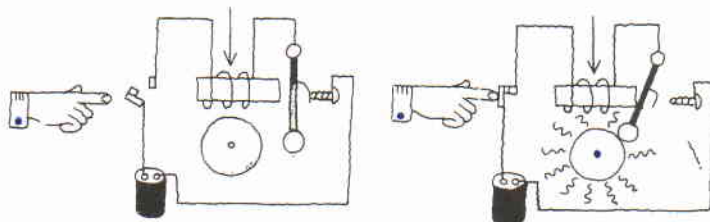
Εκτός από τον σίδηρο, υπάρχουν ορισμένα ακόμα υλικά η μαγνητική διαπερατότητα των οποίων α. είναι πολύ μεγαλύτερη από τον αριθμό «1» και β. εξαρτάται από την αρχική τιμή της έντασης του πεδίου, το οποίο προκαλεί τη μαγνήτισή τους. Τα υλικά αυτά, τα οποία χαρακτηρίζονται **σιδηρομαγνητικά,** είναι κυρίως* το νικέλιο, το κοβάλτιο σε στερεά κατάσταση και ορισμένα κράματα. Είναι σώματα που μαγνητίζονται ισχυρά ακόμα και από ασθενή μαγνητικά πεδία. Μια ακόμα ιδιαιτερότητά τους είναι πολύ χαρακτηριστική. Τα υλικά αυτά διατηρούν τις παραπάνω ιδιότητες μόνον εφόσον η θερμοκρασία τους παραμένει μικρότερη από ένα όριο. Το όριο αυτό λέγεται *θερμοκρασία Curie.* Η τιμή του είναι για κάθε ένα υλικό χαρακτηριστική. Αν το όριο ξεπεραστεί η σιδηρομαγνητικότητα χάνεται.

Τα περισσότερα υλικά στη φύση δεν εκδηλώνουν σιδηρομαγνητικότητα. Η μαγνητική τους διαπερατότητα είναι λίγο μικρότερη από τη μονάδα ($\mu<1$) πράγμα που σημαίνει ότι η εμφάνισή τους σε ένα μαγνητικό πεδίο προκαλεί στο πεδίο μια μικρή εξασθένηση. Είναι τα λεγόμενα *διαμαγνητικά* υλικά.

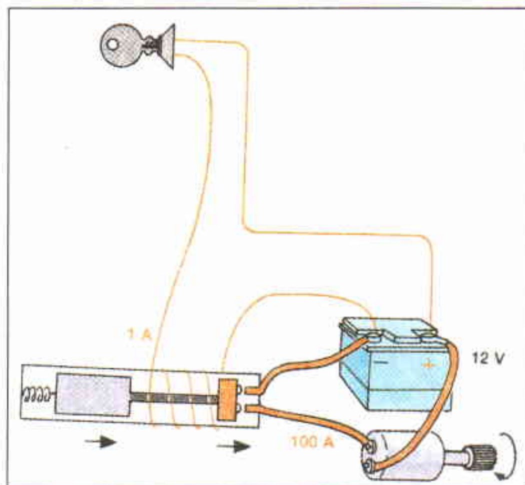
Υπάρχουν ακόμα ορισμένα υλικά όπως το υγρό και το στερεό οξυγόνο, το χρώμιο και το αργίλιο η διαπερατότητα των οποίων είναι λίγο μεγαλύτερη από τη μονάδα. Τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται *παραμαγνητικά.*

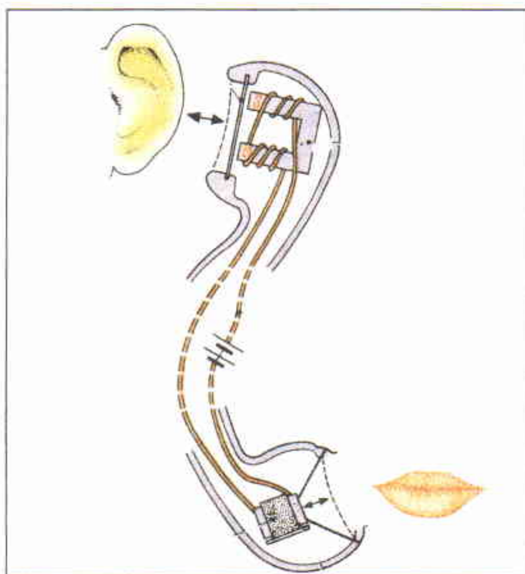
Ηλεκτρομαγνήτης. Η μαγνήτιση την οποία θα υποστεί ο μαλακός σίδηρος στο εσωτερικό του ρευματοφόρου σωληνοειδούς είναι προσωρινή. Διαρκεί όσο χρόνο διαρκεί και η ρευματοδότηση. Η προσωρινότητα αυτή αξιοποιείται με την κατασκευή ηλεκτρομαγνητών. Ο ηλεκτρομαγνήτης είναι μια διάταξη που αποτελείται από ρευματοδοτούμενο σωληνοειδές και από μαλακό σίδηρο. Τέτοιοι ηλεκτρομαγνήτες υπάρχουν στα ηλεκτρικά κουδούνια, στα τηλέφω-

* Είναι ακόμα το γαδολίνιο (Gd) και το δυσπρόσιο (Dy).



να, στα ηλεκτρομαγνητικά μεγάφωνα αλλά και στους επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων που χρησιμοποιεί η σύγχρονη έρευνα.





Για να «πάρει μπρος» η μοτοσικλέτα. Για να «πάρει μπρος» το αυτοκίνητο ή η μοτοσικλέτα βάζουμε το κλειδί της μηχανής και το στρέφουμε προς τα δεξιά. Με αυτόν τον τρόπο ενεργοποιείται ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει τη μπαταρία, δύο ειδών καλώδια, έναν ηλεκτρονόμο (ρελέ) και τη μίζα. Το πρόβλημα είναι ότι για να ενεργοποιηθεί το μοτέρ χρειάζεται πολύ μεγάλο *ρεύμα εκκίνησης* πάνω από 100 Αμπέρ. Γι' αυτό, όπως φαίνεται και στο σχήμα, υπάρχουν δύο κυκλώματα. Όταν γυρίσουμε το κλειδί κλείνει το πρώτο, αυτό δηλαδή με τα λεπτά καλώδια, το οποίο περιλαμβάνει τη δωδεκάβολτη μπαταρία και το ρελέ. Το ρεύμα στο πρώτο αυτό κύκλωμα είναι περίπου 1 αμπέρ και ενεργοποιεί το ρελέ. Το πηνίο, δηλαδή, ρευματοδοτούμενο λειτουργεί ως μαγνήτης και ασκεί δύναμη στο σιδερένιο στέλεχος οπότε κλείνει και το δεύτερο κύκλωμα. Στο δεύτερο αυτό κύκλωμα με τα χοντρά καλώδια συμμετέχει η μπαταρία αλλά το ρεύμα είναι πολύ μεγάλο. Αυτό οφείλεται και στην πολύ μικρή αντίσταση των καλωδίων.

Η φωνή στο τηλέφωνο. Το μικρόφωνο περιέχει κόκκους άνθρακα οι οποίοι συμμετέχουν στο μικροφωνικό κύκλωμα και επηρεάζουν την τιμή του ρεύματος με την αντίστασή τους. Καθώς μιλάμε, οι μεταβολές της πίεσης του αέρα προκαλούν

στην πλάκα του μικροφώνου παλμικές κινήσεις «ίδιας μορφής». Αυτό προκαλεί ανάλογες μεταβολές στην αντίσταση που παρουσιάζουν οι κόκκοι του άνθρακα με συνέπεια να διαμορφώνεται ένα μεταβαλλομένο μικροφωνικό ρεύμα, οι διακυμάνσεις του οποίου είναι οι παρόμοιες με εκείνες του αρχικού ήχου. Έτσι, ο ήχος δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μοιάζει με αυτόν.

Το ακουστικό περιλαμβάνει έναν μαγνήτη ο οποίος περιβάλλεται από πηνίο ενώ ένα σιδερένιο ευκίνητο έλασμα βρίσκεται κοντά στον μαγνήτη χωρίς να ακουμπάει πάνω του.

Καθώς το ηλεκτρικό μικροφωνικό ρεύμα ενεργοποιεί το κύκλωμα του ακουστικού το ρευματοφόρο πηνίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, οι χρονικές διακυμάνσεις του οποίου είναι παρόμοιες με εκείνες του μικροφωνικού ρεύματος. Οι συνέπειες είναι αναμενόμενες. Το έλασμα τίθεται σε παλμική κίνηση με παρόμοιες διακυμάνσεις οπότε παράγεται ήχος. Κατά τη λειτουργία, λοιπόν, του ακουστικού **το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί ήχο ο οποίος μοιάζει με αυτό.**

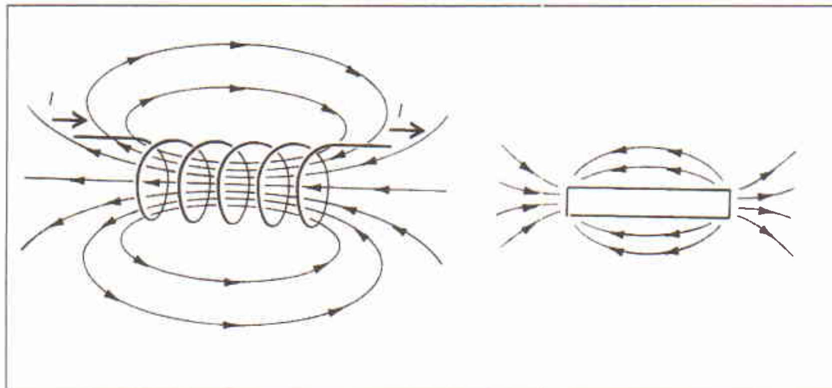
Με ανάλογο τρόπο λειτουργούν και τα μεγάφωνα. Αυτά, βέβαια, διαθέτουν μεμβράνη η οποία παράγει ήχο μεγάλης έντασης. Στα τηλέφωνα, στα μικρόφωνα, στα μεγάφωνα και στα ακουστικά παίζεται ένα «παιχνίδι ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητών».

Η έννοια μαγνητικό δίπολο

Αν βάλουμε το ρευματοφόρο σωληνοειδές σε μαγνητικό πεδίο κάτω από την επίδραση των δυνάμεων Laplace το σωληνοειδές θα προσανατολιστεί. Κάθε σπείρα του θα αποτελεί ένα ρευματοφόρο πλαίσιο. Στη θέση ευσταθούς ισορροπίας ο άξονας του σωληνοειδούς θα είναι παράλληλος προς το μαγνητικό πεδίο και τα δύο άκρα του θα βρίσκονται στις αντίστοιχες δύο θέσεις που θα βρίσκονταν οι πόλοι ενός ραβδόμορφου μαγνήτη.

Από την άλλη πλευρά, αντιμετωπίζοντας το σωληνοειδές ως πηγή μαγνητικού πεδίου είπαμε ότι το πεδίο το οποίο δημιουργεί θυμίζει το πεδίο ενός μαγνήτη ραβδόμορφου. Στο εξωτερικό του σωληνοειδούς οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται από το ένα άκρο του σωληνοειδούς στο άλλο, όπως ακριβώς στο πεδίο του μαγνήτη οι γραμμές κατευθύνονται από το βόρειο πόλο προς το νότιο.

Οι δύο αυτές παρατηρήσεις μάς επιτρέπουν να ισχυριστούμε ότι το ρευματοφόρο σωληνοειδές (όπως και κάθε ρευματοφόρο πλαίσιο) είναι ένα **μαγνητικό δίπολο.** Οι ίδιες αυτές παρατηρήσεις μπορούν να μας βοηθήσουν σε μια παραπέρα εμβάθυνση στην έν-



νοια μαγνητικό δίπολο. Ξέρουμε κατ' αρχήν ότι, όπως κάθε άλλη αφηρημένη έννοια της φυσικής, *η έννοια μαγνητικό δίπολο αναφέρεται σε ένα πράγμα που δεν προσδιορίζεται (υποχρεωτικά) από τη μορφή του, προσδιορίζεται όμως (υποχρεωτικά) από τη συμπεριφορά του.* Ένα μαγνητικό δίπολο θα μπορούσε να έχει τη μορφή ενός ραβδομαγνήτη, ενός κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού ή τη μορφή ενός ρευματοφόρου σωληνοειδούς. Θα μπορούσε όμως να είναι και κάτι σαν «μαύρο κουτί» που δεν μπορούμε να το ανοίξουμε. Το κλειστό αυτό «κουτί» θα είναι μαγνητικό δίπολο όχι γιατί έχει κάποια συγκεκριμένη μορφή. Θα αποτελεί (ή δεν θα αποτελεί) δίπολο επειδή παρουσιάζει (ή δεν παρουσιάζει) μια ορισμένη συμπεριφορά, εφόσον δηλαδή

α. Μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο υφίσταται προσανατολισμό.

ενώ το ίδιο

β. Δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές του οποίου κατευθύνονται από μια ορισμένη περιοχή (βόρειος πόλος) προς μια άλλη.

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι το μαγνητικό δίπολο είναι ο απλούστερος μαγνητικός σχηματισμός. Στον ηλεκτρισμό ο απλούστερος σχηματισμός που υπάρχει είναι το απομονωμένο ηλεκτρικό φορτίο (q) ενώ το ηλεκτρικό δίπολο είναι σχηματισμός συνθετότερος.

Ο μαγνητισμός και η δομή της ύλης

Το 1820 είναι, όπως ξέρουμε, η χρονιά που το πείραμα Oersted «γέννησε» τη βάσιμη υποψία για κάποια κοινά σημεία ανάμεσα στα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα. Στα εκατό περίπου χρόνια που ακολούθησαν –και ενώ ο ηλεκτρομαγνητισμός είχε αρχίσει να αλλάζει την εικόνα της ανθρωπότητας– κυοφορήθηκε και διαμορφώθηκε η θεωρία που είναι αποδεκτή μέχρι σήμερα.

Σύμφωνα με αυτήν **ο μαγνητισμός οφείλεται στις κινήσεις των ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στα άτομα.** Ας βάλουμε όμως τα πράγματα σε κάποια σειρά.

Από τη δεκαετία του 1820 οι φυσικοί αναγνωρίζουν πια ότι δύο «ανόμοια» πράγματα όπως ο φυσικός μαγνήτης και το ρευματοφόρο πλαίσιο δημιουργούν ένα παρόμοιο αποτέλεσμα. Απέναντι στο γεγονός αυτό οι πιθανοί δρόμοι που θα μπορούσε να τραβήξει η φυσική σκέψη ήταν τρεις:

(α) Τα ηλεκτρικά ρεύματα περιέχουν κάποιους αόρατους φυσικούς μαγνήτες.

(β) Οι φυσικοί μαγνήτες κρύβουν κάποια αόρατα ηλεκτρικά ρεύματα.

(γ) Υπάρχουν δύο διαφορετικές πηγές μαγνητισμού.

Η άποψη του Ampère. Ο Ampère υποστήριξε σθεναρά τη δεύτερη άποψη. Φαντάστηκε ότι οι μυστηριώδεις ιδιότητες των μαγνητών **έπρεπε να οφείλονται σε αόρατα κλειστά ηλεκτρικά ρεύματα,** ότι ο μαγνητισμός, δηλαδή, είχε μία και μόνο «πηγή» κι αυτή ήταν τα ηλεκτρικά ρεύματα.

Ξέρουμε ότι όσο κι αν κομματιάζουμε ένα μαγνήτη προκύπτουν πάντα μαγνήτες μικρότεροι. Το γεγονός αυτό μάς οδηγεί στο λογικό συμπέρασμα ότι και τα πιο μικρά τμήματα ενός μαγνήτη αποτελούν στοιχειώδεις μαγνήτες. Το φαινόμενο ήταν γνωστό στον Ampère. Ξεκινώντας από αυτό, ισχυρίστηκε ότι και στα μικρότατα τμήματα της ύλης –τα μόρια όπως πίστευε– υπάρχουν κλειστά μικροσκοπικά ρεύματα τα οποία ευθύνονται για τις μαγνητικές ιδιότητες.

Παρόλο όμως το αναγνωρισμένο κύρος του Ampère η εποχή του δεν ήταν ώριμη να υιοθετήσει μια τέτοια άποψη. Ας μη μας διαφεύγει ότι κατά τη δεκαετία του 1820 δεν υπάρχει ούτε νύξη για εσωτερική δομή των ατόμων και για κινούμενα ηλεκτρόνια. Η ι-

δέα του Ampère αγνοήθηκε αλλά δεν ξεχάστηκε εντελώς.

Η έννοια *μαγνητική ροπή*. Για τη συγκρότηση μιας θεωρίας για τον μαγνητισμό χρησιμοποιήθηκε εκτός από την έννοια *μαγνητικό δίπολο* και η έννοια / μέγεθος *μαγνητική ροπή*, η οποία αποτελεί το στοιχείο ταυτότητας κάθε μαγνητικού διπόλου. Είναι μέγεθος διανυσματικό. Η κατεύθυνσή της ορίστηκε έτσι ώστε, καθώς το δίπολο προσανατολίζεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο η μαγνητική ροπή του να τείνει να αποκτήσει την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Η μαγνητική ροπή ενός ραβδομαγνήτη θα έχει συνεπώς κατεύθυνση από το νότιο πόλο προς το βόρειο ενώ η μαγνητική ροπή ενός ρευματοφόρου αγωγού θα είναι κάθετη στο επίπεδο του κύκλου και με κατεύθυνση τέτοια ώστε να ανταποκρίνεται στον προσανατολισμό.

Η ολική μαγνητική ροπή ενός συστήματος διπόλων είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών ροπών. Ένα σύστημα δύο κυκλικών ρευμάτων των οποίων τα επίπεδα είναι παράλληλα έχει συνολική ροπή μηδέν εφόσον οι φορές των δύο ρευμάτων είναι αντίρροπες.

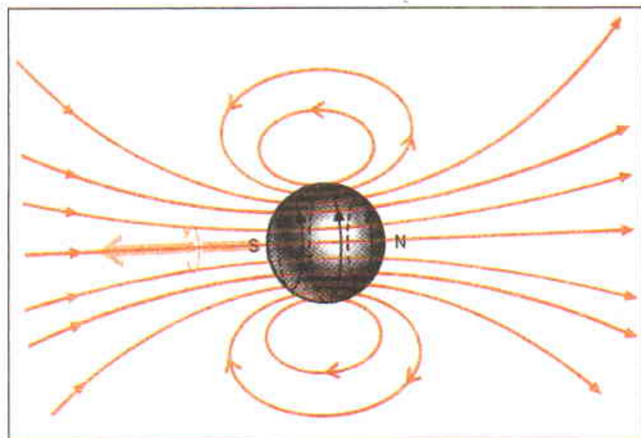
Η κίνηση των ηλεκτρονίων πηγή του μαγνητισμού. Κατά τη δεύτερη δεκαετία του αιώνα μας οι φυσικοί έχουν πια δεχθεί μια εσωτερική δομή για κάθε άτομο κι έχουν υιοθετήσει ένα ορισμένο μοντέλο γι' αυτό. Στο ατομικό μοντέλο, κάθε ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα σε κλειστή τροχιά ενώ ταυτόχρονα περιστρέφεται σα «σβούρα» γύρω από τον εαυτό του, συμμετέχει δηλαδή και σε μία κίνηση ανάλογη με την ημερήσια περιστροφική κίνηση του πλανήτη μας.

Αρχικά θεωρήθηκε ότι η περιφορά του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα, ισοδύναμη με «κλειστό ρεύμα» –δηλαδή με μαγνητικό δίπολο– ήταν υπεύθυνη για τη δημιουργία των μαγνητικών πεδίων των μαγνητών. Αυτό όμως δεν είναι παρά ένα μικρό μέρος της σημερινής άποψης.

Πολύ σύντομα επεκράτησε η ιδέα ότι η κύρια πηγή του μαγνητισμού ήταν η ιδιοπεριστροφή των ηλεκτρονίων η οποία έχει διεθνώς επικρατήσει να λέγεται spin (σπιν).

Κατά την ιδιοπεριστροφή ενός ηλεκτρονίου, η κίνηση του ηλεκτρονικού φορτίου μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με απειροστά κυκλικά ρεύματα. Καθένα από αυτά ισοδυναμεί με μικροσκοπικό μαγνητικό δίπολο οπότε και ολόκληρο το περιστρεφόμενο ηλεκτρονικό φορτίο ισοδυναμεί με μαγνητικό δίπολο και χαρακτηρίζεται από ορισμένη μαγνητική ροπή.

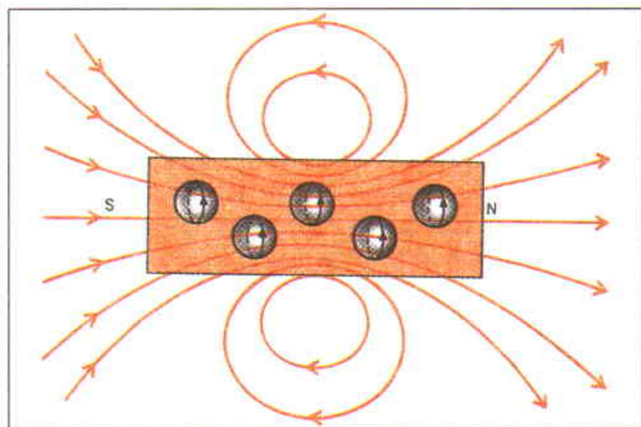
Βέβαια το μοντέλο ενός ηλεκτρονίου που περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του είναι πολύ μηχανιστικό και δεν γίνεται αποδε-



κτό από τη σύγχρονη κβαντική φυσική. Ωστόσο η ύπαρξη μαγνητικής ροπής στα στοιχειώδη αυτά σωμάτια είναι σήμερα ευρύτατα αποδεκτή και θεωρείται ότι σχετίζεται με κάποια ενδογενή περιστροφική κίνηση.

Σε ένα τυχαίο υλικό, όπως είναι, λόγου χάριν, ο χαλκός ή ο μόλυβδος, κάθε ένα από τα ηλεκτρόνια παρουσιάζει ορισμένη μαγνητική ροπή. Οι κινήσεις όμως των ηλεκτρονίων έχουν τέτοιους προσανατολισμούς ώστε μακροσκοπικά η συνολική μαγνητική ροπή να είναι ίση με μηδέν.

Αυτό όμως δεν ισχύει για τους μόνιμους μαγνήτες. Οι μαγνητικές ροπές και τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κυρίως από τα spin των ηλεκτρονίων τους δεν αλληλοαναιρούνται αλλά συνθέτουν τη μαγνητική ροπή και το μαγνητικό πεδίο που συνοδεύει κάθε μαγνήτη μόνιμο.

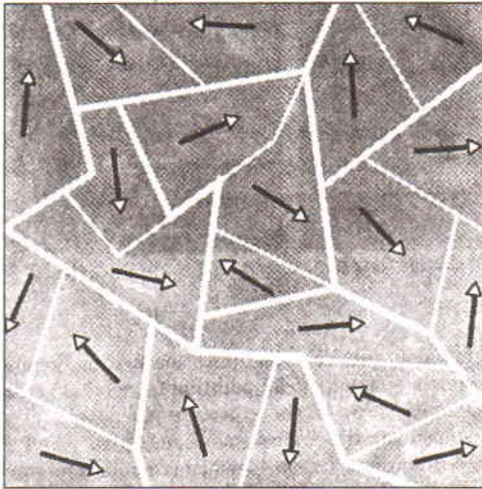


Η θεωρία Weiss. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και σε όλα τα σιδηρομαγνητικά υλικά. Η θεωρία όμως αυτή δεν μπορεί να εξηγήσει απόλυτα τις ιδιαιτερότητές τους.

Η ιδιαίτερη συμπεριφορά των σιδηρομαγνητικών υλικών ερμηνεύεται καλύτερα με τη λεγόμενη θεωρία Weiss (Βάις). Είναι μια θεωρία που υποστηρίζει ότι κάθε σιδηρομαγνητικό υλικό –σε θερμοκρασία χαμηλότερη από τη χαρακτηριστική του θερμοκρασία Curie– αποτελείται από μικροσκοπικές περιοχές που λέγονται μαγνητικές περιοχές (domains) Weiss. Τα άτομα κάθε περιοχής έχουν μαγνητικές ροπές «αυστηρά» προσανατολισμένες προς μια ορισμένη κατεύθυνση.

Όταν το σιδηρομαγνητικό σώμα βρεθεί μέσα σε κάποιο «εξωτερικό» μαγνητικό πεδίο, οι μαγνητικές ροπές κάθε περιοχής τείνουν να προσανατολιστούν με αποτέλεσμα το σώμα να αποκτά μαγνητική ροπή και να μαγνητίζεται. Σε ορισμένα υλικά ο προσανατολισμός εξακολουθεί να υφίσταται και μετά την απομάκρυνση από το

εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Τα υλικά αυτά είναι οι γνωστοί μας μόνιμοι μαγνήτες. Σε άλλες όμως περιπτώσεις, από τη στιγμή που παύει να επιδρά το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, η θερμική κίνηση έχει σαν αποτέλεσμα τα υλικά να επανέρχονται στην προηγούμενη κατάσταση.



Οι γραμμικές διαστάσεις των περιοχών Weiss έχουν μέγεθος της τάξης των 10^{-3} μέχρι 10^{-5} cm, πράγμα που σημαίνει ότι γίνονται ορατές και με μικροσκόπιο.

Όλα αυτά αποτελούν κομμάτια μιας θεωρίας η οποία δεν έχει μέχρι σήμερα αναιρεθεί. Εννοείται ότι για το *πώς* θα αντιλαμβανόμαστε τα πράγματα αύριο δεν μπορούμε να κάνουμε καμιά πρόβλεψη. *Η εξέλιξη της επιστήμης είναι μια εντυπωσιακή διαδικασία αμφισβητήσεων, διαψεύσεων, επαληθεύσεων, ενοποιήσεων, εδραιώσεων και ανατροπών η οποία δεν σταματάει ποτέ.*

Να συνοψίσουμε:

1. Όλα τα μαγνητικά πεδία οφείλονται σε ηλεκτρικά φορτία κινούμενα.

2. Η κίνηση κάθε ηλεκτρονίου μέσα στο άτομο και κύρια η ιδιοπεριστροφή του δημιουργεί ένα στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο και ευθύνεται για τις μαγνητικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών.

3. Οι προσανατολισμοί που παρουσιάζουν τα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα στον μικρόκοσμο του κάθε σώματος μπορούν να μας δικαιολογήσουν τις μακροσκοπικές μαγνητικές ιδιότητες του σώματος.

4. Στις σύγχρονες απόψεις για τον σιδηρομαγνητισμό εμπεριέχεται και η θεωρία Weiss. Δεχόμαστε ότι τα σιδηρομαγνητικά υλικά αποτελούνται από μαγνητικές περιοχές σε κάθε μία από τις οποίες υφίσταται ένας «αυστηρός» προσανατολισμός των στοιχειωδών μαγνητικών διπόλων.

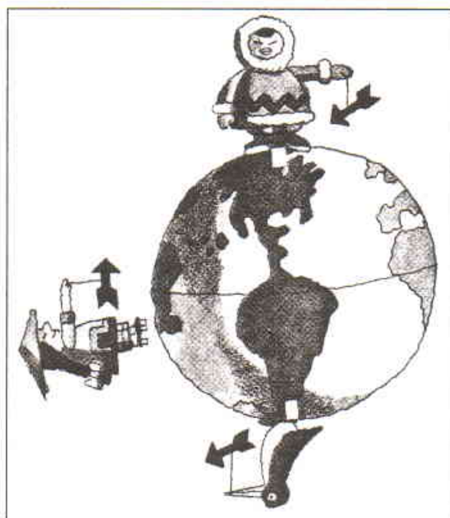
Το μαγνητικό πεδίο της Γης

Μια μαγνητική βελόνα κρεμασμένη με κατακόρυφο νήμα από το κέντρο βάρους της, προσανατολίζεται κατά την κατεύθυνση του γήινου μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$, εφόσον βέβαια στην περιοχή της δεν υπάρχουν άλλες πηγές μαγνητικών πεδίων που να επιδρούν πάνω της.

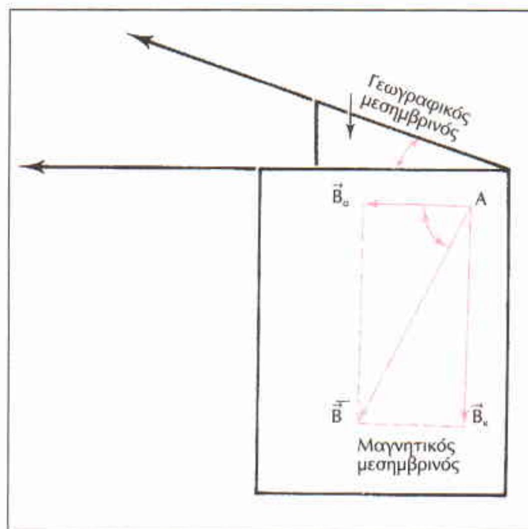
Το γεωμαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου και σε κάθε χρονική στιγμή περιγράφεται με τα στοιχεία του διανύσματος $\vec{B}$. Το διάνυσμα $\vec{B}$ κάθε τόπου ανήκει σε ένα συγκεκριμένο κατακόρυφο επίπεδο που λέγεται *μαγνητικός μεσημβρινός του τόπου.*

Από το τέλος του 15ου αιώνα οι Ευρωπαίοι γνώριζαν ότι η μαγνητική βελόνα δεν δείχνει ακριβώς προς τον βόρειο πόλο. Το κατακόρυφο επίπεδο (μαγνητικός μεσημβρινός) στο οποίο ισορροπεί σχηματίζει με τον γεωγραφικό μεσημβρινό του τόπου μια δίεδρη γωνία η οποία λέγεται **μαγνητική απόκλιση.** Κάθε απόκλιση χαρακτηρίζεται ως ανατολική ή δυτική, εφόσον αντίστοιχα ο βόρειος πόλος της βελόνας βρίσκεται ανατολικά ή δυτικά του γεωγραφικού μεσημβρινού.

Μια ακόμα παρατήρηση που έκαναν επίσης οι Ευρωπαίοι κατά τον επόμενο αιώνα, ήταν ότι κατά την ισορροπία της η βελόνα δεν ήταν οριζόντια. Στη γλώσσα του πεδίου μπορούμε να πούμε ότι σε κάθε τόπο το διάνυσμα $\vec{B}$ σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο μία γωνία που λέγεται **μαγνητική έγκλιση.** Όταν το διάνυσμα $\vec{B}$ κατευθύνεται προς τα κάτω –όπως συμβαίνει στην Ευρώπη– η έγκλιση θεωρείται θετική. Σε αντίθετη περίπτωση η έγκλιση θεωρείται αρνητική. Συνήθως αναλύουμε το διάνυσμα $\vec{B}$ σε δύο κάθετες συνιστώσες κατά τρόπο ώστε και οι δύο να ανήκουν στο επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού. Η μία από τις συνιστώσες ($\vec{B}_o$) είναι οριζόντια* και η άλλη ($\vec{B}_\kappa$) είναι, βέβαια, κατακόρυφη.

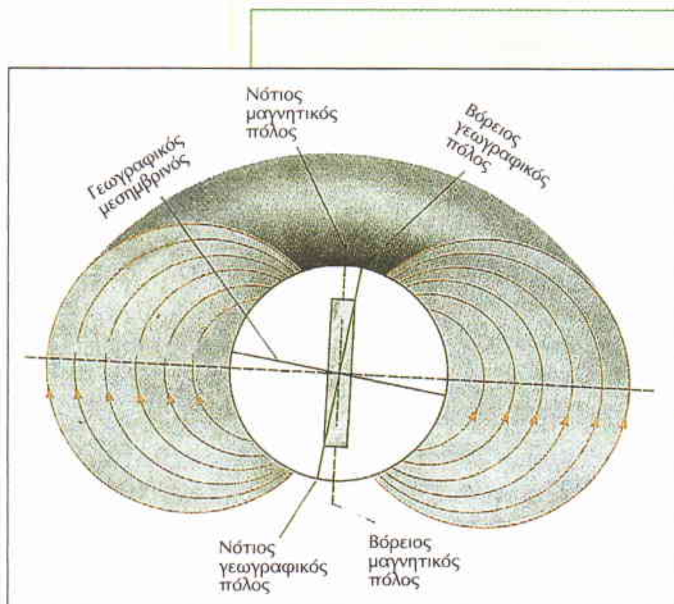


* Πρέπει να σημειωθεί ότι η μαγνητική βελόνα την οποία συνήθως διαθέτουμε είναι στρεπτή περί κατακόρυφο άξονα. Αυτό σημαίνει ότι κατά την κίνησή της διατηρείται σε οριζόντιο επίπεδο. Όταν, συνεπώς, ισορροπεί μας δείχνει την οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου.



Σε κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε τόπο το γήινο μαγνητικό πεδίο προσδιορίζεται από τα τρία μαγνητικά στοιχεία: α) την μαγνητική απόκλιση β) τη μαγνητική έγκλιση και γ) την οριζόντια συνιστώσα $\vec{B}_o$. Οι τιμές και των τριών μαγνητικών στοιχείων παρουσιάζουν περιοδικές αλλά και απότομες μεταβολές. Οι περιοδικές μεταβολές είναι ημερήσιες και ετήσιες. Οι απότομες μεταβολές συνοδεύουν ορισμένα φυσικά φαινόμενα όπως είναι οι ηλιακές κηλίδες, το πολικό σέλας και οι σεισμοί.

Τα δύο σημεία στα οποία η έγκλιση είναι ίση με +90° και –90° τα σημεία δηλαδή στα οποία η κρεμασμένη μαγνητική βελόνα γίνεται κατακόρυφη αποτελούν τους δύο μαγνητικούς πόλους της Γης. Οι δύο αυτοί πόλοι βρίσκονται κοντά στους γεωγραφικούς πόλους χωρίς όμως να συμπίπτουν με αυτούς. Στο βόρειο ημισφαίριο κοντά στο βορειοδυτικό άκρο της Γροινλανδίας βρίσκεται ο ένας γεωμαγνητικός πόλος, ο οποίος σύμφωνα με τους ορισμούς που έχουμε δεχθεί αποτελεί ένα «νότιο» μαγνητικό πόλο.



Σε μια πρώτη προσέγγιση το γεωμαγνητικό πεδίο θυμίζει το πεδίο που θα δημιουργούσε ένας ραβδομαγνήτης ο οποίος θα βρισκόταν στο κέντρο της Γης και θα σχημάτιζε μια γωνία περίπου 11,5° με τον γήινο άξονα περιστροφής.



Ερωτήσεις και προβλήματα



3.1. α) Τι ακριβώς εννοούμε με τον όρο *δύναμη Laplace;*
β) Σε ποια συμπεράσματα, σχετιζόμενα με τη δύναμη αυτή, μάς οδηγεί η πειραματική έρευνα;

3.2. Πώς ορίζεται η διεύθυνση του μεγέθους *ένταση μαγνητικού πεδίου;*

3.3. α) Ποια είναι η συμπεριφορά ενός ρευματοφόρου πλαισίου μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο;
β) Πώς ερμηνεύεται θεωρητικά η συμπεριφορά αυτή;

3.4. Ρευματοδοτούμε ένα μεταλλικό πλαίσιο το οποίο βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Ποιο είναι το εμπόδιο που θα αντιμετωπίσουμε προκειμένου να δημιουργήσουμε έναν ηλεκτρικό κινητήρα; Πώς ξεπέρασαν το εμπόδιο αυτό οι τεχνικοί της εποχής του Ampère;

3.5. Κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Από τι εξαρτάται η ένταση του μαγνητικού πεδίου σ' ένα σημείο του
α) στη γενική περίπτωση
β) σε περίπτωση που ο αγωγός είναι ευθύγραμμος;

3.6. Περιγράψτε το μαγνητικό πεδίο ενός ευθυγράμμου ρευματοφόρου αγωγού. Κάντε και ένα κατάλληλο σχήμα.

3.7. Τι λέγεται πηνίο; Τι το ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένα σωληνοειδές πηνίο;

3.8. Περιγράψτε το μαγνητικό πεδίο ενός ρευματοφόρου σωληνοειδούς.

3.9. Ποια είναι η εξίσωση ορισμού του μεγέθους *μαγνητική διαπερατότητα;* Τι παριστάνει το κάθε σύμβολο σ' αυτή την εξίσωση;

3.10. Ποια είνα η ιδιαιτερότητα των σιδηρομαγνητικών υλικών;

3.11. Ποια υλικά χαρακτηρίζονται α) διαμαγνητικά β) παραμαγνητικά;

3.12. Από τι αποτελείται ο ηλεκτρομαγνήτης; Ποια ιδιότητα αξιοποιείται κατά την κατασκευή του;

3.13. Να αναφέρετε τέσσερις εφαρμογές ηλεκτρομαγνητών.

3.14. Η κίνηση κάθε ηλεκτρονίου ισοδυναμεί με μαγνητικό δίπολο. Σε ποια κίνηση αναφερόμαστε;

3.15. Τι είναι οι περιοχές Weiss;

3.16. Τι λέγεται μαγνητική απόκλιση; Πότε χαρακτηρίζεται ανατολική;

3.17. Τι λέγεται μαγνητική έγκλιση; Πότε χαρακτηρίζεται θετική;



Να αναρωτηθούμε...

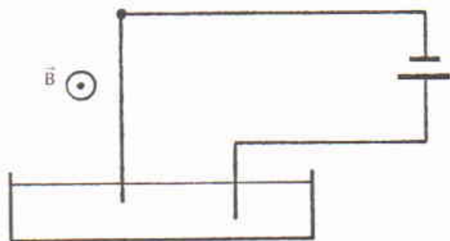
3.18. Περιγράψτε δύο τρόπους με τους οποίους μπορούμε να ανιχνεύσουμε την ύπαρξη μαγνητικού πεδίου.

3.19. Η δύναμη Laplace η ασκούμενη σε ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό ο οποίος βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο
α) Έχει την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών του πεδίου

β) Είναι κάθετη στον αγωγό ακόμα κι αν ο αγωγός δεν είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές του πεδίου
γ) Εξαρτάται από το υλικό του αγωγού
δ) Εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή εφόσον ο αγωγός είναι παράλληλος με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου.
Με ποιο απ' αυτά διαφωνείτε;

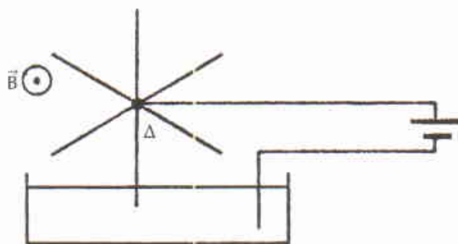
3.20. Μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο βρίσκεται ένα ρευματοφόρο πλαίσιο. Τι θα συμβεί αν αντιστρέψουμε ταυτόχρονα τη φορά του μαγνητικού πεδίου και τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος;

3.21. Ένα χάλκινο ευθύγραμμο σύρμα μπορεί να κινείται σε κατακόρυφο επίπεδο γύρω από το ακλόνητο άκρο του, όπως στο σχήμα. Το άλλο άκρο του είναι βυθισμένο στον υδράργυρο μιας λεκάνης. Το κύκλωμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα (I) ενώ ταυτόχρονα βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο (B). Τι θα συμβεί αν (α) $I = 0$, $B \neq 0$· (β) $I \neq 0$, $B = 0$· (γ) $I \neq 0$, $B \neq 0$.



Τι θα αλλάξει αν αντιστρέψουμε τους πόλους της πηγής;

3.22. Ένας τροχός αποτελείται από χάλκινες ισομήκεις ακτίνες κατανεμημένες ομοιόμορφα –όπως φαίνεται στο σχήμα– και μπορεί να στρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα (Δ). Οι ακτίνες έρχονται σε επαφή με τον υδράργυρο της λεκάνης. Ο άξονας περιστροφής και ο υδράργυρος συνδέονται με πηγή σταθερής ηλεκτρεγερτικής δύναμης. Αν το σύστημα βρεθεί σε ομογενές μαγνητικό πεδίο αρχίζει να περιστρέφεται. Εξηγήστε το φαινόμενο.



3.23. Πώς μπορούμε να αντιπαραθέσουμε τη συμπεριφορά που παρουσιάζουν μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο μια μαγνητική βελόνα και ένα ρευματοφόρο πλαίσιο;

3.24. Μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο
α) Ένα ρευματοφόρο πλαίσιο προσανατολίζεται έτσι ώστε το επίπεδό του να είναι παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές.
β) Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός δεν προσανατολίζεται
γ) Μια μαγνητική βελόνα προσανατολίζεται έτσι ώστε ο άξονάς της να είναι παράλληλος προς τις δυναμικές γραμμές.
Με ποια απ' αυτά συμφωνείτε;

3.25. Η μαγνητική βελόνα ακίνητη δείχνει το βορρά. Είναι δυνατόν να «συγκινηθεί» αν πλησιάσουμε α) έναν μαγνήτη, β) ένα ρευματοφόρο καλώδιο κάθετα στον άξονά της, γ) ένα σιδερένιο καρφί. Με ποια απ' αυτά συμφωνείτε;

3.26. Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός απείρου μήκους αποτελεί πηγή μαγνητικού πεδίου. Αναφορικά με το πεδίο αυτό:
α) Η ένταση του πεδίου σε συγκεκριμένο σημείο είναι ανάλογη προς την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό
β) Η ένταση του πεδίου στα διάφορα σημεία είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης του σημείου από τον αγωγό.
γ) Όταν ο ρευματοφόρος αγωγός είναι οριζόντιος οι δυναμικές γραμμές είναι κυκλικού σχήματος το επίπεδο των οποίων είναι οριζόντιο.

Με ποιο απ' αυτά συμφωνείτε;

3.27. Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός συμπεριφέρεται ως μαγνητικό δίπολο; Δικαιολογήστε την απάντηση.

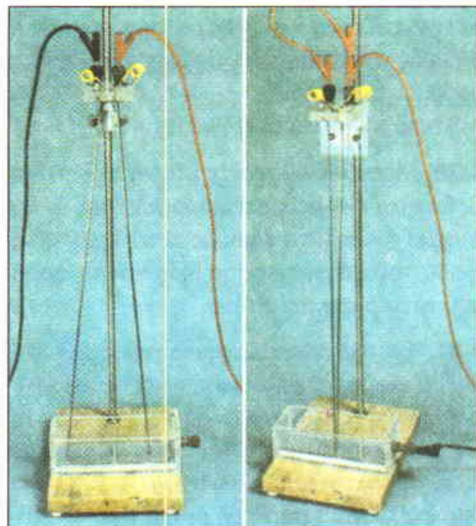
3.28. Ένα ρευματοφόρο σωληνοειδές με μήκος ℓ και n σπείρες αποτελεί πηγή μαγνητικού πεδίου. Σχετικά με το πεδίο αυτό
α) Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς το πεδίο είναι ομογενές
β) Οι δυναμικές γραμμές του είναι κυκλικού σχήματος
γ) Η εξίσωση $B = 4\pi K_\mu In/\ell$ μας δίνει το μέτρο της έντασης σε οποιοδήποτε σημείο γύρω από το σωληνοειδές.
Με ποιο απ' αυτά συμφωνείτε;

3.29. Αν στο εσωτερικό ενός ρευματοφόρου σωληνοειδούς βάλουμε ένα κομμάτι μαλακό σίδηρο:
α) Ο σίδηρος δεν θα μαγνητιστεί
β) Στα άκρα του σιδερένιου κομματιού οι δυναμικές γραμμές θα πυκνώσουν
γ) Το ότι «η ένταση μαγνητικού πεδίου θα αυξηθεί μ φορές» θα σημαίνει ότι η μαγνητική διαπερατότητα του μαλακού σιδήρου είναι ίση με μ.
Με ποια απ' αυτά συμφωνείτε;

3.30. α) Σιδηρομαγνητικά υλικά είναι μόνο ο σίδηρος και το κοβάλτιο.
β) Ο σίδηρος και το κοβάλτιο διατηρούν τη σιδηρομαγνητικότητά τους εφόσον η θερμοκρασία τους είναι μικρότερη από έναν όριο.
Με ποιο απ' αυτά συμφωνείτε;

3.31. α) Αν θερμάνουμε μια καρφίτσα και η θερμοκρασία της ξεπεράσει ένα όριο, η καρφίτσα χάνει τη σιδηρομαγνητικότητα της.
β) Σιδηρομαγνητικά υλικά είναι μόνον ο σίδηρος και το κοβάλτιο.
γ) Η μαγνητική διαπερατότητα των διαμαγνητικών υλικών είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα.
Με ποιο απ' αυτά συμφωνείτε;

3.32. Δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρεόμενοι από ομόρροπα ρεύματα απωθούνται. Πως μπορούμε να οδηγηθούμε θεωρητικά σ' αυτό το συμπέρασμα;



3.33. α) Τα ηλεκτρόνια των ατόμων ενός χάλκινου δίσκου δεν έχουν όλα μαγνητική ροπή.
β) Όλα τα ηλεκτρόνια των ατόμων ενός μόνιμου μαγνήτη έχουν μαγνητική ροπή.
γ) Οι κινήσεις των ηλεκτρονίων των ατόμων ενός μολύβδινου σωλήνα έχουν τέτοιους προσανατολισμούς ώστε η συνολική μαγνητική ροπή να είναι ίση με το μηδέν.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

3.34. Με ποια από τα παρακάτω συμφωνείτε;
α) Το μαγνητικό δίπολο προσδιορίζεται υποχρεωτικά από τη μορφή του.
β) Η μαγνητική βελόνα συμπεριφέρεται ως μαγνητικό δίπολο.
γ) Κάθε ρευματοφόρο σωληνοειδές συμπεριφέρεται ως μαγνητικό δίπολο.
δ) Κάθε ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός συμπεριφέρεται ως μαγνητικό δίπολο.
ε) Το μαγνητικό δίπολο προσδιορίζεται υποχρεωτικά από τη συμπεριφορά του.
στ) Η κίνηση καθενός από τα ηλεκτρόνια ενός

ατόμου και κυρίως η ιδιοπεριστροφή του δημιουργεί ένα στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο.

3.35. Να συμπληρώσετε τα κενά επιλέγοντας από τα παρακάτω:

• Γεωγραφικός • Βημε • Κατακόρυφο • Απόκλιση • Οριζόντιο • Βσυνε • Αρνητική • Μαγνητικός • Έγκλιση

.... Μεσημβρινός λέγεται το .... επίπεδο στο οποίο βρίσκεται η μαγνητική βελόνα όταν ισορροπεί. Μαγνητική .... λέγεται η γωνία που σχηματίζει το διάνυσμα του γήινου μαγνητικού πεδίου με το .... επίπεδο. Αν είναι B_{op} η οριζόντια συνιστώσα του γήινου μαγνητικου πεδίου B και ε η έγκλιση ισχύει B_{op} = ... Η έγκλιση στην περιοχή της Αττικής είναι ....



Να λύσουμε προβλήματα

Να θεωρήσετε γνωστή την τιμή της σταθεράς K_μ (ίση με 10^{-7} N/A^2) και την τιμή της βαρυτικής επιτάχυνσης g = 10 m/s^2.

3.36. Ένας ευθύγραμμος αγωγός μήκους 14 cm διαρρέεται από ρεύμα 5 A και βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο 0,03 T. Να προσδιορίσετε τη δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στον αγωγό εφόσον

α) είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές

β) σχηματίζει γωνία 30 μοιρών με τις δυναμικές γραμμές

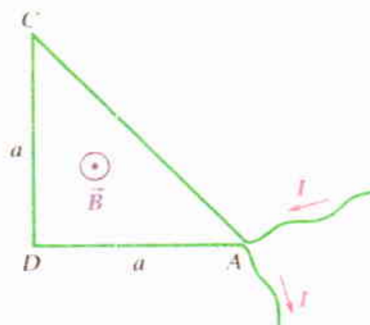
γ) είναι παράλληλος με τις δυναμικές γραμμές.

3.37. Ένας ευθύγραμμος αγωγός έχει μήκος 40 cm, διαρρέεται από ρεύμα 12 A και βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Διαπιστώνεται ότι αν βρεθεί σε ορισμένη θέση δεν ασκείται σ' αυτόν δύναμη, ενώ αν στραφεί κατά 90° η ασκούμενη δύναμη είναι ίση με 1,6 N. Σας ζητούμε να υπολογίσετε την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

3.38. Κάποιος πειραματιστής έχει μπροστά του έναν κατακόρυφο ρευματοφόρο αγωγό μήκους 80 cm ο οποίος βρίσκεται σε οριζόντιο μαγνητικό πεδίο 0,4 T με κατεύθυνση από δεξιά προς αριστερά σύμφωνα με την αντίληψη του παρατηρητή. Το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό είναι 8 A με φορά από κάτω προς τα πάνω. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε τη δύναμη που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στον ρευματοφόρο αγωγό.

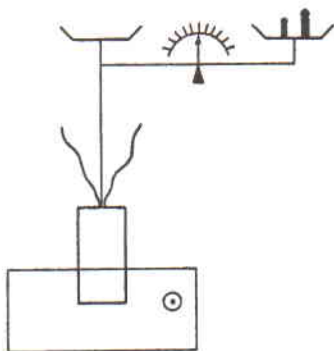
3.39. Φανταστείτε ότι βρίσκεστε σε μια περιοχή του Ισημερινού όπου η ένταση του μαγνητικού πεδίου της Γης είναι οριζόντια και έχει μέτρο 3.10^{-5}T. Στα χέρια σας κρατάτε έναν οριζόντιο ευθύγραμμο αγωγό τον οποίο και προσανατολίζετε κατά τη διεύθυνση Ανατολή-Δύση. Ποιο θα είναι το ρεύμα που θα πρέπει να διαρρέει τον αγωγό, ώστε να μπορεί να ισορροπεί; Θεωρήστε ότι το σύρμα έχει μάζα 5.10^{-3} kg ανά μέτρο μήκους.

3.40. Ο ρευματοφόρος αγωγός που παριστάνεται στο σχήμα βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο και σχηματίζει ένα ορθογώνιο ισοσκελές τρίγωνο. Προσδιορίστε τη συνολική μαγνητική δύναμη που ασκείται σ' αυτό τον αγωγό.



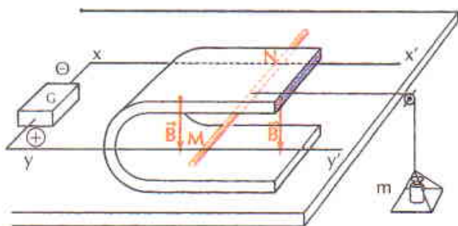
3.41. Διαθέτουμε ένα συρμάτινο πλαίσιο ορθογώνιου σχήματος διαστάσεων 10cmx 30cm με 100 σπείρες και αντίσταση 2 Ω, το οποίο ρευματοδοτούμε συνδέοντας τα άκρα

του με πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης E = 2,5 V και εσωτερικής αντίστασης r = 0,5 Ω.



α) Υπολογίστε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος.
β) Το πλαίσιο κρέμεται από τον ένα δίσκο ζυγού όπως στο σχήμα, ενώ το κατώτερο τμήμα του βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο B. Μηδενίζουμε το ρεύμα και βλέπουμε ότι για την ισορροπία απαιτούνται ορισμένα σταθμά. Όταν ρευματοδοτούμε διαπιστώνουμε ότι για να υπάρξει ισορροπία χρειάζεται να προσθέσουμε στο δίσκο σταθμά μάζας 1,02 g. Δικαιολογήστε γιατί συμβαίνει αυτό, και υπολογίστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$.

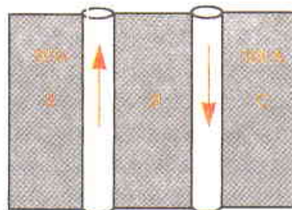
3.42. Πάνω στους οριζόντιους και παράλληλους μεταλλικούς αγωγούς xx' και yy' τοποθετείται μια μεταλλική ράβδος μήκους 10 cm και αντίστασης 1 Ω. Τα άκρα των μεταλλικών αγωγών συνδέονται με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής της οποίας τα «στοιχεία ταυτότητας» είναι E = 10 V και r = 1 Ω. Η ράβδος μπορεί να μετακινείται πάνω στους αγωγούς χωρίς τριβές και με τρόπο ώστε η γωνία που θα σχηματίζει με αυτούς να είναι διαρκώς ορθή. Ένας πεταλοειδής μαγνήτης δημιουργεί στην περιοχή της ράβδου ομογενές μαγνητικό πεδίο 0,2 T με φορά προς τα κάτω. Η ράβδος μπορεί να παραμένει ακίνητη εφόσον στο δίσκο που παριστάνεται στο σχήμα τοποθετηθούν ορισμένης μάζας σταθμά. Υπολογίστε τη μάζα των απαιτουμένων σταθμών.



3.43. Ένας ευθύγραμμος αγωγός βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση και διαρρέεται από ρεύμα 10 A με φορά προς τα πάνω. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε απόσταση 2 cm από τον αγωγό και να συγκρίνετε την τιμή της με εκείνη της οριζόντιας συνιστώσας του γεωμαγνητικού πεδίου η οποία στην περοχή που βρίσκεται ο αγωγός είναι $2{,}5\ 10^{-5}$ T.

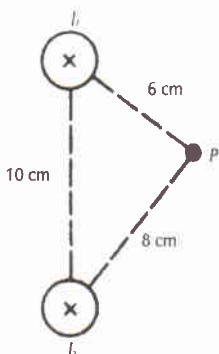
3.44. Ένας ευθύγραμμος αγωγός Λ βρίσκεται σε οριζόντια θέση μπροστά σε κάποιο παρατηρητή και διαρρέεται από ρεύμα 20 A φοράς από δεξιά προς τα αριστερά. Σας ζητούμε να προσδιορίσετε
α) την ένταση του μαγνητικού πεδίου σε σημείο Α το οποίο βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με τον αγωγό και σε απόσταση 5 εκατοστών από αυτόν
β) τη δύναμη που θα ασκηθεί σε έναν άλλο αγωγό μήκους 1 m, ο οποίος είναι παράλληλος προς τον Λ «περνάει από το σημείο Α» και διαρρέεται από ρεύμα 4 A ομόρροπο με εκείνο του αγωγού Λ.

3.45. Οι δύο παράλληλοι αγωγοί διαρρέονται από ρεύματα I_1 = 100A και I_2= 50A αντίστοιχα. Σε ποια περιοχή βρίσκονται τα



σημεία στα οποία το μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται; (α) μόνο στην A; (β) μόνο στη B; (γ) στην A και στην C; (δ) σε καμιά από αυτές;

3.46. Δύο μεγάλου μήκους παράλληλοι αγωγοί απέχουν 10 cm και διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα I_1 = 4A και I_2= 2A. Προσδιορίστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο P το οποίο απέχει από τους δύο αγωγούς (σχήμα) 6 cm και 8 cm αντίστοιχα.



3.47. Στα άκρα ενός σωληνοειδούς 500 σπειρών εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού 24 V. Σας ζητούμε να περιγράψετε το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς. Το μήκος του σωληνοειδούς είναι 40 εκατοστά και η ηλεκτρική αντίστασή του 3Ω.

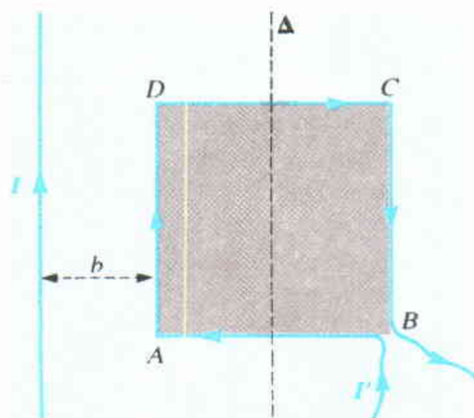
3.48. Ένα σωληνοειδές με 4.000 σπείρες έχει μήκος 60 cm. Πόσο πρέπει να είναι το ρεύμα που το διαρρέει ώστε στο εσωτερικό του να δημιουργείται μαγνητικό πεδίο 0,1 T;

3.49. Ένα σωληνοειδές 600 σπειρών έχει μήκος 50 εκατοστά και ωμική αντίσταση 2,5Ω. Τα άκρα του συνδέονται με τους πόλους μιας ηλεκτρικής πηγής με εσωτερική αντίσταση 0,5Ω. Με ειδικό μαγνητόμετρο διαπιστώνεται ότι η ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι $4{,}52\ 10^{-3}$ T. Σας ζητούμε να υπολογίσετε α) το ρεύμα του κυκλώματος και β) την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής.

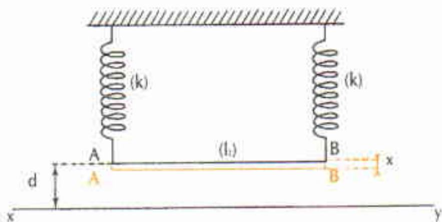
3.50. Ένα σωληνοειδές έχει 200 σπείρες και μήκος 25 cm, ενώ η ηλεκτρική αντίσταση που παρουσιάζει το σύρμα του είναι 1,5Ω. Τα άκρα του σωληνοειδούς συνδέονται με τους πόλους πηγής σταθερής ΗΕΔ 12 V και εσωτερικής αντίστασης 0,5Ω. Υπολογίστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται στο εσωτερικό του σωληνοειδούς.

3.51. Το σύρμα ενός σωληνοειδούς 500 σπειρών έχει αντίσταση 0,9Ω. Στα άκρα του σωληνοειδούς εφαρμόζεται τάση 9 V α) Υπολογίστε την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει. β) Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς υπάρχει σιδηρομαγνητικός πυρήνας ο οποίος εμφανίζει μαγνητική διαπερατότητα μ = 1000. Υπολογίστε την ένταση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς αν είναι γνωστό ότι το μήκος του είναι ίσο με 40 εκατοστά.

3.52. Ένα συρμάτινο πλαίσιο έχει τετράγωνο σχήμα με πλευρά 10 cm διαρρέεται από ρευμα I' = 20A και θεωρείται αβαρές. Ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος (I) αγωγός άπειρου μήκους τοποθετείται στο επίπεδο του πλαισίου παράλληλα προς την πλευρά AD και σε ορισμένη απόσταση b = 5cm από αυτήν. α) Περιγράψτε το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί ο ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός σε κάθε σημείο του πλαισίου. β) Υπολογίστε τη συνισταμένη των μαγνητικών δυνάμεων που ασκούνται στο πλαίσιο αν I = 10A.



3.53. Ένας μεταλλικός αγωγός ΑΒ, μήκους 20 cm, διατηρείται με τη βοήθεια δύο όμοιων ελατηρίων σε θέση οριζόντια. Στο ίδιο



κατακόρυφο επίπεδο και σε απόσταση 5 cm κάτω από αυτόν βρίσκεται ένας ευθύγραμμος αγωγός άπειρου μήκους. Ρευματοδοτούμε τους δύο αγωγούς με I_1 = 20A και I_2 = 50A (σχήμα) οπότε δημιουργείται μια νέα θέση ισορροπίας του ΑΒ, 2 cm χαμηλότερα από την προηγούμενη. Υπολογίστε τη σταθερά «k» καθενός από τα ελατήρια.

3.54. Η μαγνητική έγκλιση ενός τόπου είναι -30° και η οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου είναι $0{,}25.10^{-4}$T. Προσδιορίστε την ένταση του γεωμαγνητικού πεδίου $\vec{B}$ στον τόπο αυτόν. Κάνετε ένα σχήμα στο οποίο να παριστάνετε το μαγνητικό μεσημβρινό του τόπου και τα διανύσματα της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας του $\vec{B}$.

3.55. Μια μαγνητική βελόνα –που μπορεί να περιστρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα– ισορροπεί κατά τη διεύθυνση της οριζόντιας συνιστώσας (B_{op}) του γεωμαγνητικού πεδίου. Ακριβώς από πάνω τοποθετούμε ένα τεντωμένο καλώδιο παράλληλα προς τον άξονά της σε απόσταση 4 cm. Ρευματοδοτούμε το καλώδιο και η βελόνα στρέφεται κατά 22°. Πόση είναι η ένταση του ρεύματος; Δίνεται ότι B_{op} = $2{,}5\ 10^{-5}$ T και ότι εφ22^0 = 0,4.



Ντοκουμέντο

Κεραυνοί αυθεντίες και φιλοσοφικό κλίμα

(Απόσπασμα από άρθρο δημοσιευμένο στο περιοδικο *Φυσικός κόσμος***)**

Από τα μέσα του 17ου αιώνα άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες γραπτές μαρτυρίες σχετικά με ένα «μυστηριώδες» φαινόμενο πούχε συμβεί επανειλημμένα στη διάρκεια ναυτικών ταξιδιών.

Αναφερόταν στην επίδραση των κεραυνών πάνω σε πυξίδες καραβιών που ταξίδευαν.

Το γεγονός είχε προξενήσει κατάπληξη στους ναυτικούς που έτυχε να το παρατηρήσουν. Το θεωρούσαν μυστηριώδες και ανεξήγητο. Επανειλημμένα είχαν ζητήσει την εξήγησή του από τους επιστήμονες της εποχής χωρίς να πάρουν κάποια απάντηση. Τι σχέση μπορούσε να έχει η πτώση ενός κεραυνού με τη μαγνητική βελόνα μιας πυξίδας; Εδώ δεν θα πρέπει να μας διαφεύγει ότι η εποχή δεν γνωρίζει ακόμα πως ο κεραυνός είναι ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα τέτοιου είδους ερώτημα απέναντι στο οποίο η επιστήμη της εποχής έδειχνε ανίσχυρη να ανταποκριθεί πρέπει να **μας φέρει στο μυαλό τα αντίστοιχα «μυστηριώδη φαινόμενα» που υπάρχουν στην εποχή μας και μένουν χωρίς καμιά κάλυψη από τη σημερινή επιστήμη.** Οι ιπτάμενοι δίσκοι, το τρίγωνο των Βερμούδων, η τηλεπάθεια, είναι ορισμένα μονάχα απ' αυτά. Η μελέτη της ιστορίας της επιστήμης είναι ένας πολύ καλός τρόπος να μας βοηθήσει να συνειδητοποιήσουμε ότι **η επιστήμη ποτέ δεν είναι κάτι που έχει τελειώσει,** η επιστήμη κάθε εποχής δεν είναι τίποτε άλλο από ένα σημείο σ' αυτή την διόλου ευθύγραμμη τροχιά που κάνει η ανθρώπινη σκέψη μέσα στην ιστορία. Ας ξανάρθουμε, όμως, στα μέσα του 17ου αιώνα και στο πρόβλημα των πυξίδων.

Μια από τις παλιότερες μαρτυρίες πάνω σ' αυτό το πρόβλημα περιέχεται σε μια επιστολή χρονολογημένη στα 1676 η οποία στάλθηκε από το Δουβλίνο στον εκδότη του επιστημονικού περιοδικού «Philosophical Transactions».

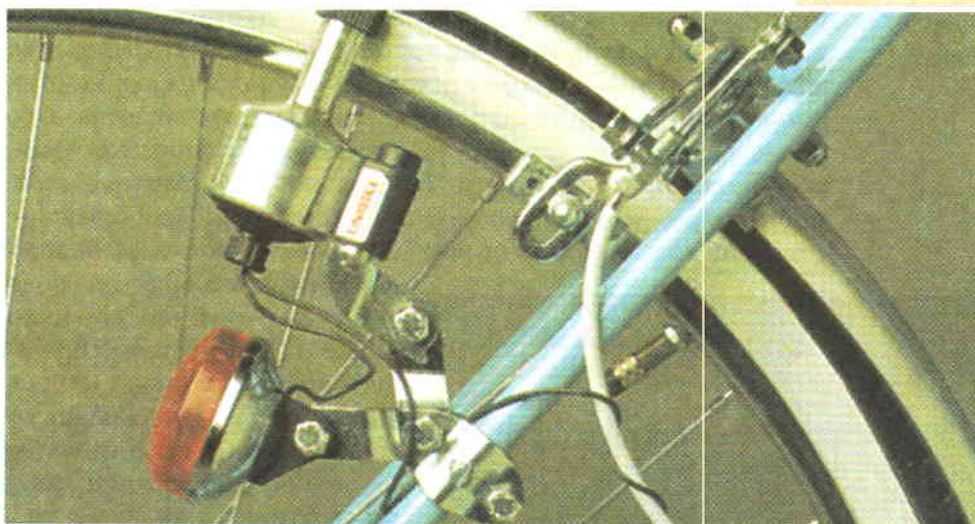
Στην επιστολή αναφέρεται ότι κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού προς τις Barbados νήσους και ενώ το καράβι βρισκόταν στον μεσημβρινό που περνάει από τις Βερμούδες ένας δυνατός κεραυνός χτύπησε το καράβι με μια πολύ παράξενη συνέπεια. Αμέσως μετά την πτώση του η πυξίδα αποπροσανατολίστηκε. Ο Βόρειος πόλος της έγινε Νότιος και ο Νότιος Βόρειος, με αποτέλεσμα το πλοίο να αρχίσει να ακολουθεί την ακριβώς αντίθετη κατεύθυνση από την αρχική. Σε λίγο μάλιστα διαπιστώθηκε ότι όλες οι πυξίδες του καραβιού βρίσκονταν στην ίδια κατάσταση.

Καθώς περνάνε τα χρόνια οι μαρτυρίες πάνω σ' αυτό το θέμα πολλαπλασιάζονται και εμπλουτίζονται. Μια καινούρια παρατήρηση είναι ότι με την πτώση των κεραυνών συμβαίνει να μαγνητίζονται και μεταλλικά σκεύη, όπως, για παράδειγμα, τα μαχαίρια και τα πηρούνια. Η πρώτη τέτοιου είδους εμπειρία αναφέρεται σε μια μαρτυρία που κι αυτή δημοσιεύτηκε στο «Philosophical Transactions» στα 1735. Την διηγείται ένας έμπορος από το Wakefields. Φύλαγε σε μια ξύλινη κασέλα ένα μεγάλο αριθμό από μαχαίρια και πηρούνια φαγητού και όταν έπεσε κεραυνός διαπίστωσε ότι τα μαχαιροπήρουνα είχαν μαγνητιστεί. Τα πράγματα, λοιπόν, έδειχναν ότι κάποια σχέση έπρεπε να υπάρχει ανάμεσα στον κεραυνό και στον μαγνητισμό.

Ο Benjamin Franklin, που είναι γνωστός σαν εφευρέτης του αλεξικέραυνου, υπήρξε μία από τις μεγαλύτερες προσωπικότητες της Αμερικής του 18ου αιώνα και ταυτόχρονα ένας από τους σκαπανείς της επιστήμης του Ήλεκτρισμού. Ήταν ο πρώτος άνθρωπος που κατάλαβε ότι ο κεραυνός, αυτή η τρομερή δύναμη της φύσης, δεν ήταν τίποτε άλλο από μια ηλεκτρική εκκένωση, ένα ηλεκτρικό ρεύμα, ανάμεσα στο σύννεφο και τη γη.

Ύστερα απ' αυτό (1750) θα περίμενε κανείς, αν όχι να «φανεί» η σχέση ηλεκτρισμού-μαγνητισμού, τουλάχιστον να αρχίσει να δημιουργείται κάποια πεποίθηση προς αυτή την κατεύθυνση. Η ιστορία της επιστήμης, όμως, είναι γεμάτη από τέτοια παραδείγματα όπου ενώ όλα «φαίνονται έτοιμα» για να γίνει ένα βήμα προς μια κατεύθυνση, το βήμα αυτό, άμεσα τουλάχιστον, δεν πραγματοποιείται. Αυτό δεν θα πρέπει να μας κάνει εντύπωση. Γιατί το να μας κάνει εντύπωση σημαίνει είτε ότι προσπαθήσαμε να «δούμε» τα γεγονότα με τα μάτια του 20ου αιώνα είτε ότι δεν πήραμε υπόψη ορισμένες ιδιαιτερότητες που ρυθμίζουν τις εξελίξεις των γεγονότων της ιστορίας της επιστήμης. Έτσι, κοιτάζοντας τα πράγματα με ματιά 20ού αιώνα είναι πιθανό να δούμε πως ύστερα από την ανακάλυψη του Franklin (ότι ο κεραυνός είναι ηλεκτρισμός) έπρεπε να γίνει το επόμενο βήμα, προς την κατεύθυνση της ενοποίησης ηλεκτρισμού και μαγνητισμού. Αυτό, όμως, δεν συνέβη και δεν είναι τόσο δύσκολο να διακρίνουμε μερικές από τις βασικές αιτίες για τις οποίες δεν συνέβη, όπως είναι (α) η αδυναμία να πραγματοποιηθούν σοβαρές πειραματικές προσπάθειες προς αυτή την κατεύθυνση αλλά και (β) η ανυπαρξία ενός κατάλληλου φιλοσοφικού κλίματος.

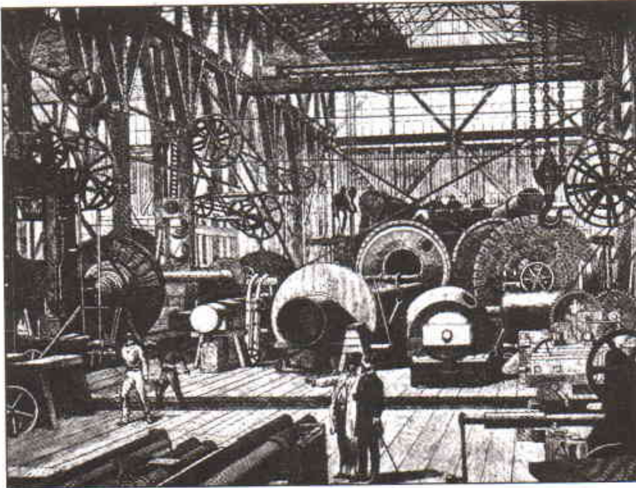
Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή



Το πρόβλημα της μεταφοράς ενέργειας • **Η ανακάλυψη** • Οι δρόμοι της λογικής • Ο δρόμος του πειράματος • ***Το φαινόμενο ηλεκτρομαγνητική επαγωγή*** • Στο εργαστήριο • Η αιτία και το αποτέλεσμα • **Οι νόμοι** • Ο νόμος Faraday • Ο κανόνας του Lenz • **Επαγωγή και διατήρηση της ενέργειας** • **Αυτεπαγωγή** • Η σκέψη και τα φαινόμενα • Πηνίο και αυτεπαγωγή • Ενέργεια μαγνητικού πεδίου • **Η αξιοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής** • Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος • Αρμονικά εναλλασσόμενη τάση • Αρμονικά εναλλασσόμενο ρεύμα • Μέση ισχύς • Ρεύμα συνεχές και ρεύμα εναλλασσόμενο • Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας • Ο μετασχηματιστής • **Να θυμηθούμε** • **Να αναρωτηθούμε** • **Να λύσουμε προβλήματα** • **Ντοκουμέντο.**

Το πρόβλημα της μεταφοράς ενέργειας

Η ατμομηχανή. Κατά τον 18ο αιώνα στην Ευρώπη ξεκίνησε η ιστορικής σημασίας αλλαγή που έχει επικρατήσει να χαρακτηρίζεται Βιομηχανική Επανάσταση. Ανάμεσα στις βασικές συνιστώσες αυτής της αλλαγής ήταν και η ανακάλυψη της ατμομηχανής όπως και η παραπέρα βελτίωσή της η οποία επέτρεψε στους ανθρώπους να αξιοποιούν τα μεγάλα αποθέματα ενέργειας που «κρύβονταν» στο κάρβουνο, στο ξύλο και αργότερα στο πετρέλαιο. Η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρεπόμενη σε θερμική ενέργεια μπορούσε πια, μέσω του ατμού, να προσφέρει την πολύτιμη ενέργεια κίνησης την οποία είχε μεγάλη ανάγκη η ραγδαία αναπτυσσόμενη βιομηχανία της εποχής. Το έτος 1807 εμφανίστηκε και το πρώτο ατμόπλοιο και λίγο αργότερα η πρώτη σιδηροδρομική μηχανή, ενώ τα εργοστάσια με μηχανές ατμού πλήθαιναν αδιάκοπα.



Η λειτουργία όμως των μηχανών στα εργοστάσια παρουσίαζε και σοβαρά μειονεκτήματα. Οι πελώριες και βαριές ατμομηχανές μόλυναν υπερβολικά την ατμόσφαιρα, ενώ η συνολική διαδικασία μειονεκτούσε σοβαρά σε ζητήματα όπως η μεταβίβαση της κίνησης. Για να μεταβιβαστεί η κίνηση στις κλωστομηχανές ή στους τόρνους των απέραντων εργοστασιακών αιθουσών χρειαζόταν ένα ολόκληρο «δάσος» από τροχαλίες, ιμάντες και άξονες.

Υπήρχε όμως ένα ακόμα πρόβλημα που ήταν και το σοβαρότερο. Οι εργοστασιακές εγκαταστάσεις έπρεπε να χτίζονται οπωσδήποτε κοντά στα ορυχεία γιατί διαφορετικά θα ήταν υπερβολικά ασύμφορη η μεταφορά καυσίμων από το ορυχείο προς το εργοστάσιο. Η ενέργεια ήταν πολύ δύσκολο να μεταφερθεί. **Η ατμοενέργεια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μόνο στον τόπο της παραγωγής της.** Το πρόβλημα θα μπορούσε ίσως, να αντιμετωπιστεί με **μια καινούργια ανακάλυψη**

η οποία θα πρόσφερε ενέργεια ικανή να διανέμεται από τα κέντρα παραγωγής προς τους τόπους κατανάλωσης. Ο δρόμος που οδηγούσε προς τη νέα ανακάλυψη είχε ανοιχτεί από τις συγκεκριμένες ανάγκες της βιομηχανίας της εποχής.

Η επιστήμη. Δύο περίπου δεκαετίες μετά την ανακάλυψη της στήλης του Volta, οι επιστήμονες είχαν αρχίσει να πιστεύουν ότι η λύση στο πρόβλημα της μεταφοράς ενέργειας θα μπορούσε να προέλθει από τον ηλεκτρισμό.

Υπήρχε όμως μία αδυναμία στο ζήτημα της παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η χημική ενέργεια της βολταϊκής στήλης έδειχνε να εξαντλείται πολύ γρήγορα και φαινόταν ακατάλληλη για τον ρόλο αυτό. Ήταν αναγκαίο να επινοηθεί ένας καλύτερος τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η λύση φαινόταν ότι θα μπορούσε να δοθεί από τη νεαρά, τότε, επιστήμη του ηλεκτρομαγνητισμού. Το πείραμα Oersted και οι συνακόλουθες έρευνες είχαν πείσει ότι ο ηλεκτρισμός μπορούσε να «παράγει» μαγνητισμό. Το ερώτημα που γεννιόταν ήταν αν ο μαγνητισμός θα μπορούσε να «παράγει» ηλεκτρισμό, αν υπήρχε δηλαδή φαινόμενο αντίθετο από αυτό που είχε ήδη ανακαλυφθεί. Πολύ σύντομα τα επιστημονικά περιοδικά της Γαλλίας και της Αγγλίας πλημμύρισαν από άρθρα σχετικά με πειράματα και υποθέσεις πάνω στον ηλεκτρομαγνητισμό. Το πρόβλημα ήταν καίριο και η απάντηση αργούσε να δοθεί. Ήταν η ώρα που εμφανίστηκε στο προσκήνιο ο Michael Faraday, ο ταπεινής καταγωγής αυτοδίδακτος ερευνητής με την ασήμαντη μαθηματική κατάρτιση ο οποίος όμως συνέβαινε να διαθέτει μία ασυνήθιστη φαντασία και μία εκπληκτική ικανότητα στην πραγματοποίηση πειραματικών ερευνών. Στα 1831 ανακάλυψε το ανυπολόγιστης αξίας φαινόμενο μέσα από το οποίο οι άνθρωποι βρήκαν τον δρόμο που οδηγούσε στην παραγωγή ηλεκτρισμού σε μεγάλη κλίμακα. Το καινούργιο φαινόμενο ονομάστηκε **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.** Η αξιοποίηση του επρόκειτο να αλλάξει ριζικά τον τρόπο ζωής και εργασίας αλλά και αυτήν ακόμα τη νοοτροπία των ανθρώπων του μέλλοντος.



Το έτος 1856 ο Faraday έχει πια αναγνωριστεί. Ο πίνακας τον παρουσιάζει να δίνει τη χρονιά εκείνη μια επιστημονική διάλεξη.

Η ανακάλυψη

Το πρόβλημα της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος είχε απασχολήσει τον Faraday από τις αρχές της δεκαετίας του 1820. Η πορεία προς τη μεγάλη ανακάλυψη υπήρξε μακρόχρονη και βασανιστική.

Οι δρόμοι της λογικής

Ας δούμε πρώτα τη λογική αφετηρία από την οποία ξεκίνησε η καινούργια ανακάλυψη.

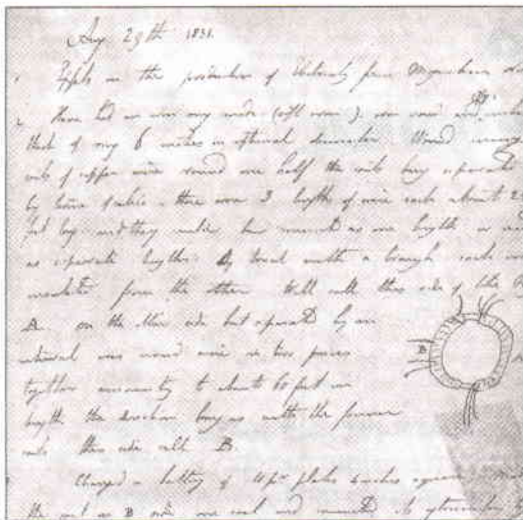
α. Η λογική του «αντιστρόφου». Την ίδια περίπου εποχή ο Ampère έχει αποδείξει ότι κάθε ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Χρησιμοποιώντας μία λογική «αντιστρόφου» ο Faraday ερεύνησε, το εάν η παρουσία ενός μαγνήτη κοντά σε ένα κλειστό κύκλωμα θα μπορούσε να δημιουργήσει ηλεκτρικό ρεύμα στο κύκλωμα αυτό.

β. Η λογική της αναλογίας. Ο Faraday είχε δείξει μεγάλο ενδιαφέρον για το φαινόμενο *Ηλεκτροστατική επαγωγή*. Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το ηλεκτρικό φορτίο ενός αγωγού «επάγει» αντίθετα φορτία σ' έναν γειτονικό αγωγό αρχικά αφόρτιστο. Ακολουθώντας μια λογική αναλογίας ο Faraday ερεύνησε το εάν ένα ηλεκτρικό ρεύμα θα μπορούσε να «επάγει» ένα άλλο ηλεκτρικό ρεύμα σε κάποιο γειτονικό κύκλωμα.

Ο δρόμος του πειράματος

Τα περισσότερα πειράματα του Faraday πραγματοποιήθηκαν προς τις δύο ερευνητικές κατευθύνσεις στις οποίες οδηγούσαν οι παραπάνω λογικές. Προσπάθησε δηλαδή μέσα από μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων να δημιουργήσει (επάγει) ηλεκτρικό ρεύμα σ' ένα κύκλωμα χρησιμοποιώντας είτε (i) ισχυρούς μαγνήτες τους οποίους τοποθετούσε κοντά στο κύκλωμα είτε (ii) το ρεύμα ενός γειτονικού κυκλώματος.

Μερικές δεκάδες βολταϊκές στήλες, μαγνήτες, χάλκινα σύρματα και κομμάτια από σίδερο αποτελούσαν τη βασική υλικοτεχνική του υποδομή. Διέθετε όμως και ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο, για την εποχή εκείνη, ανιχνευτή ηλεκτρικού ρεύματος το λεγόμενο γαλβανόμετρο. Το όργανο αυτό αποτελείτο από μια ελαφριά μαγνητική βελόνα αιωρούμενη ανάμεσα σε δύο πηνία. Συνδέοντας τα δύο πηνία κατάλληλα μπορούσε από τη μετακίνηση της μαγνητικής βελόνας να ανιχνεύει την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος σε αυτά. Στο ημερολόγιό


Aug 29th 1831.

Απόσπασμα από το ημερολόγιο του Faraday, στο οποίο περιγράφει την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ημερομηνία: 29 Αυγούστου 1831.

του βρίσκουμε πολυάριθμες περιγραφές των πειραμάτων που πραγματοποίησε. Όλες όμως καταλήγουν στην ίδια περίπου παρατήρηση. *«Δεν υπήρξε καμία ένδειξη»*.

Τέλος, το καλοκαίρι του 1831 πήρε το πρώτο ενθαρρυντικό μήνυμα. Το καινούργιο φαινόμενο είχε ανακαλυφθεί*.

Ο Faraday, αντίθετα από τον Oersted, δεν έσπευσε να ανακοινώσει το εύρημα. Συνέχισε την έρευνα πραγματοποιώντας πολλά ακόμα πειράματα ενώ ταυτόχρονα αναζητούσε τις βαθύτερες αιτίες οι οποίες δημιουργούσαν τα επαγωγικά ρεύματα. Μέσα σε λίγους μήνες είχε καταφέρει να διατυπώσει τον νόμο στον οποίο υπακούει το φαινόμενο αλλά και να κατασκευάσει την πρώτη γεννήτρια ρεύματος που λειτούργησε με βάση το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Είχε, μ' άλλα λόγια, καταφέρει να βάλει το θεμέλιο λίθο της ηλεκτρικής βιομηχανίας του μέλλοντος.

Στα παρακάτω θα μελετήσουμε το φαινόμενο ακολουθώντας ένα ορισμένο πρόγραμμα. Σύμφωνα με αυτό:

α) θα καταφύγουμε στο εργαστήριο όπου θα ασχοληθούμε με συγκεκριμένα πειράματα

β) θα επιδιώξουμε να «διακρίνουμε» την κοινή αιτία και το κοινό αποτέλεσμα όλων των πειραματικών διαδικασιών και να συγκροτήσουμε έναν ορισμό του φαινομένου

γ) θα παρουσιάσουμε τους νόμους στους οποίους υπακούει το φαινόμενο

δ) θα επιδιώξουμε να συνδέσουμε θεωρητικά το φαινόμενο και τους νόμους του με τον υπόλοιπο κορμό της φυσικής.

---

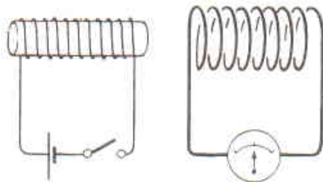
* Το 1830, ένα χρόνο πριν ο Faraday φθάσει στην ανακάλυψη, ένας από τους μεγαλύτερους Αμερικάνους επιστήμονες της εποχής, ο Joseph Henry (Τζόζεφ Χένρυ) από την άλλη πλευρά του Ατλαντικού είχε καταφέρει να δημιουργήσει επαγωγικά ρεύματα. Παρόλο που σήμερα θεωρείται βέβαιο ότι η ανακάλυψη του Henry προηγήθηκε, η ανακάλυψη του φαινομένου αποδίδεται στον Michael Faraday, γιατί ο Henry καθυστέρησε τη δημοσίευσή της.

Το φαινόμενο ηλεκτρομαγνητική επαγωγή

Στο εργαστήριο

Στα διάφορα πειράματα θα υπάρχει μια πηγή μαγνητικού πεδίου, που μπορεί να είναι είτε μαγνήτης είτε ρευματοφόρο πλαίσιο. Μπορούμε να τη λέμε *επαγωγέα*. Θα υπάρχει επίσης το κύκλωμα στο οποίο –εφ' όσον θα είναι κλειστό– θα επάγονται ηλεκτρικά ρεύματα. Αυτό θα το λέμε *επαγώγιμο*.

Πρώτη σειρά πειραμάτων. Επαγώγιμο ακίνητο, ως προ την πηγή μαγνητικού πεδίου. Πειραματιζόμαστε με δύο πηνία τα οποία διατηρούμε ακίνητα σε μικρή μεταξύ τους απόσταση. Το κύκλωμα του ενός (πρωτεύον) περιλαμβάνει ηλεκτρική γεννήτρια και διακόπτη, ενώ τα άκρα του άλλου (δευτερεύοντος-επαγώγιμου) συνδέονται, χωρίς παρεμβολή γεννήτριας, με γαλβανόμετρο.

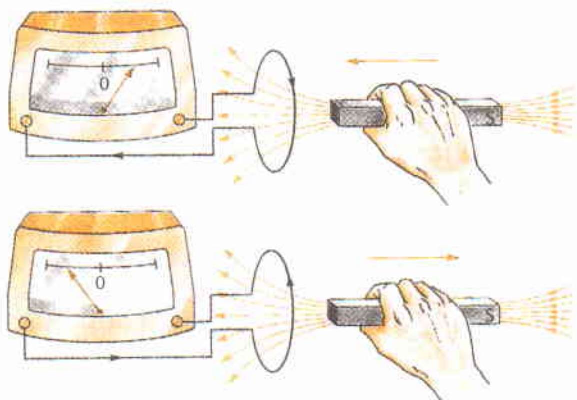


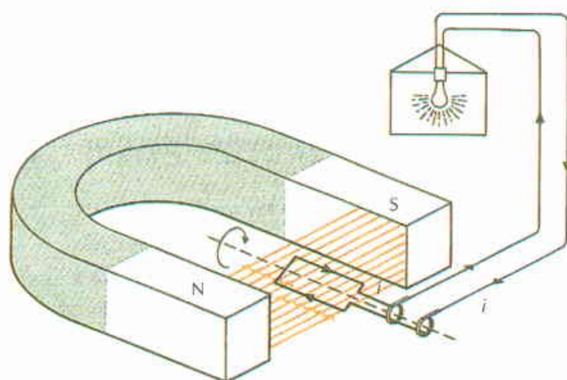
Καθώς κλείνουμε τον διακόπτη του πρωτεύοντος το γαλβανόμετρο προδίδει τη διέλευση ρεύματος στο δευτερεύον κύκλωμα. Το ρεύμα αυτό διαρκεί ελάχιστο χρόνο και συγκεκριμένα όσο χρόνο χρειάστηκε για να σταθεροποιηθεί το ρεύμα του πρωτεύοντος. Μόλις αποκατασταθεί η σταθεροποίηση, το ρεύμα του δευτερεύοντος μηδενίζεται.

Αν ανοίξουμε τον διακόπτη του πρωτεύοντος, στο δευτερεύον θα εμφανιστεί ηλεκτρικό ρεύμα αντίθετης φοράς από το προηγούμενο που σύντομα και αυτό μηδενίζεται.

Κλείνουμε πάλι το πρωτεύον κύκλωμα και με τη βοήθεια ενός ροοστάτη –που έχουμε συνδέσει εν τω μεταξύ– προκαλούμε συνεχή αύξηση του ρεύματος. Τώρα το γαλβανόμετρο δείχνει ότι στο δευτερεύον επάγεται ρεύμα. Αν προκαλέσουμε ελάττωση του ρεύματος του πρωτεύοντος, στο άλλο κύκλωμα θα διαπιστώσουμε ρεύμα αντίθετης φοράς. Το φαινόμενο λέγεται *αμοιβαία επαγωγή*.

Δεύτερη σειρά πειραμάτων. Επαγώγιμο κινούμενο ως προς την πηγή μαγνητικού πεδίου. 1. Συνδέουμε τα άκρα ενός πηνίου με γαλβανόμετρο και πλησιάζουμε προς το πηνίο το βόρειο πόλο ενός μαγνήτη. Διαπιστώνουμε ότι (α) στο κλειστό κύκλωμα του (ε-





παγώγιμου) πηνίου δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. (β) Το ρεύμα διαρκεί όσο και η κίνηση του μαγνήτη προς το επαγώγιμο. (γ). Αν πλησιάσουμε πιο γρήγορα τον μαγνήτη εμφανίζεται ρεύμα μεγαλύτερης έντασης. (δ) Η φορά του ρεύματος αντιστρέφεται αν αντί για τον βόρειο, πλησιάζουμε τον νότιο πόλο του μαγνήτη. (ε) Καθώς πλησιάζουμε τον μαγνήτη αντιλαμβανόμαστε τη δράση κάποιας δύναμης που αντιστέκεται στην προσέγγιση. Εννοείται ότι για να την εξουδετερώνουμε θα πρέπει κατά την παρέμβασή μας να μεταβιβάζουμε ενέργεια, να **εκτελούμε έργο.** Φθάνουμε σε αντίστοιχες διαπιστώσεις απομακρύνοντας τον μαγνήτη από το πηνίο το οποίο διατηρούμε ακίνητο, αλλά και γενικότερα κάθε φορά που ο μαγνήτης και το πηνίο βρεθούν με οποιονδήποτε τρόπο σε σχετική κίνηση, παρατηρούμε ανάλογα φαινόμενα.

Το ίδιο θα συμβεί και σε περίπτωση που αντί για μαγνήτη χρησιμοποιήσουμε ως πηγή μαγνητικού πεδίου ένα οποιοδήποτε ρευματοφόρο πλαίσιο.

2. Θέτουμε σε περιστροφή ένα συρματένιο πλαίσιο το οποίο βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο. Η περιστροφή γίνεται γύρω από άξονα που βρίσκεται στο επίπεδο του πλαισίου και είναι κάθετος στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Τα άκρα του πλαισίου συνδέονται με κλειστό κύκλωμα χωρίς γεννήτρια στο οποίο όμως υπάρχει και ένας ανιχνευτής ηλεκτρικού ρεύματος. Καθώς πραγματοποιείται η περιστροφή διαπιστώνουμε ότι (α) το κύκλωμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μεταβαλλόμενης φοράς (β) για να διατηρήσουμε κατά την περιστροφή σταθερή συχνότητα χρειάζεται να παρεμβαίνουμε διαρκώς ασκώντας δυνάμεις, χρειάζεται μ' άλλα λόγια **να εκτελούμε έργο.** Αυτό σημαίνει ότι από τη στιγμή που επάγεται ρεύμα στο πλαίσιο, ασκούνται πάνω του δυνάμεις που «διαφωνούν» με την περιστροφική του κίνηση.

Χρειάζεται, ίσως, να συνοψίσουμε. Στα πειράματα της πρώτης σειράς

(i) δεν υπήρξε καμία σχετική κίνηση πηγής μαγνητικού πεδίου και επαγώγιμου.

(ii) δεν χρειάστηκε να εκτελέσουμε έργο για να πετύχουμε την εμφάνιση ηλεκτρικού ρεύματος στο επαγώγιμο.

Στα πειράματα της δεύτερης σειράς

i) η πηγή του μαγνητικού πεδίου παρουσίασε σχετική κίνηση ως προς το επαγώγιμο.

ii) ήταν αναγκαίο να εκτελέσουμε έργο για να δημιουργηθεί ρεύμα στο επαγώγιμο.

Η αιτία και το αποτέλεσμα

Ερχόμαστε τώρα στα συμπεράσματα. Ας αναρωτηθούμε καταρχήν «ποιο κοινό στοιχείο εμφανίστηκε και στα τέσσερα πειράματα;» Εδώ δεν θα δυσκολευτούμε να απαντήσουμε. Σε καθένα από αυτά δημιουργήθηκε ηλεκτρικό ρεύμα χωρίς να υπάρχει ούτε ηλεκτρικό στοιχείο ούτε συσσωρευτής στο αντίστοιχο κύκλωμα. Το κοινό στοιχείο βρίσκεται, λοιπόν, στα *αποτελέσματα*. Αντίθετα, οι *αιτίες* φάνηκαν να ποικίλουν από τα πειράματα της πρώτης σειράς όπου απλώς μεταβάλλουμε το ρεύμα ενός κυκλώματος μέχρι το τελευταίο όπου βάλαμε ένα συρματένιο πλαίσιο σε περιστροφή μέσα σε μαγνητικό πεδίο ομογενές. **Ποιο κοινό στοιχείο θα μπορούσε να κρύβεται κάτω από όλες αυτές τις φαινομενικά διαφορετικές αιτίες;**

Ο Faraday κατάφερε και το «είδε». Σε όλα αυτά τα φαινόμενα υπάρχει *κάτι* που μεταβάλλεται διαρκώς και τα φαινόμενα εξελίσσονται μόνο εφ' όσον αυτό το *κάτι* συνεχίζει να μεταβάλλεται. Θα μπορούσαμε να το διακρίνουμε και εμείς. Για το σκοπό αυτό το τελευταίο πείραμα ενδείκνυται περισσότερο. Το μαγνητικό πεδίο είναι χρονικά σταθερό και ομογενές. Καθώς, όμως, περιστρέφεται το πλαίσιο υπάρχει κάποιο στοιχείο το οποίο αδιάκοπα μεταβάλλεται. Είναι αυτό ακριβώς που διέκρινε ο Faraday, δηλαδή **ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που τέμνουν την επιφάνεια του πλαισίου σε κάθε χρονική στιγμή.**

Οι φυσικοί έχουν επινοήσει ένα συγκεκριμένο μέγεθος το οποίο εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών δυναμικών γραμμών που περνούν από μία επιφάνεια. Το μέγεθος λέγεται ροή μαγνητικού πεδίου ή απλά **μαγνητική ροή.**

Η *μαγνητική ροή* είναι ένα μονόμετρο μέγεθος το οποίο –μαζί με την ένταση –περιγράφει το μαγνητικό πεδίο. Συμβολίζεται με το

γράμμα Φ, αναφέρεται σε μια επιφάνεια η οποία βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο και εκφράζει τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνούν από αυτήν.

α. Ας υποθέσουμε ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές και ότι η επιφάνεια (εμβαδού S) είναι επίπεδη και κάθετη στις δυναμικές γραμμές. Εφοδιάζουμε την επιφάνεια με ένα διάνυσμα $\vec{n}$ κάθετο σ' αυτήν . Εάν η κατεύθυνση του $\vec{n}$ συμπίπτει με την κατεύθυνση του $\vec{B}$ η μαγνητική ροή ορίζεται ως το γινόμενο της έντασης επί το εμβαδόν της επιφάνειας. Γράφουμε:

$$\Phi = BS$$

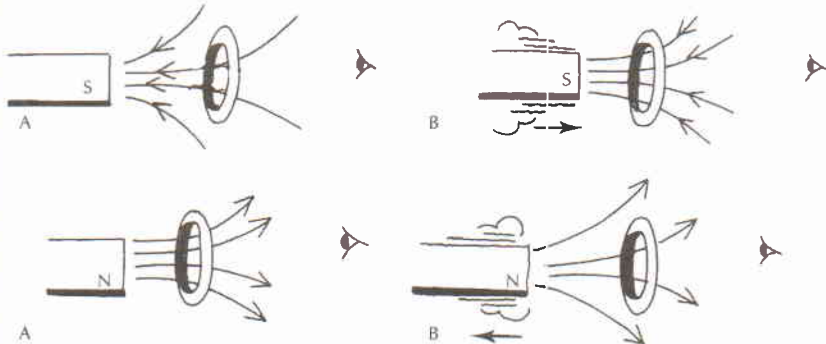
β. Εάν η επιφάνεια είναι σε θέση κάθετη προς την προηγούμενη έτσι ώστε καμιά δυναμική γραμμή να μην την διαπερνά η μαγνητική ροή είναι εξ ορισμού ίση με μηδέν.

γ. Ο συνδυασμός των παραπάνω οδηγεί στην εξίσωση

$$\Phi = BS\,\text{συνα}$$

όπου «α» θα είναι η γωνία του διανύσματος $\vec{n}$ με το διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου $\vec{B}$. Η μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής λέγεται Weber (Βέμπερ) και συμβολίζεται με 1Wb.

Αν επιστρέψουμε στα πειράματα της πρώτης σειράς, εύκολα θα αναγνωρίσουμε ότι κατά την εξέλιξη όλων των φαινομένων μεταβάλλεται ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που τέμνουν κάθε σπείρα του επαγώγιμου. Παρατηρείται, μ' άλλα λόγια, μεταβολή της μαγνητικής ροής.



Μπορούμε, γενικεύοντας να ισχυριστούμε ότι **η αιτία όλων των επαγωγικών ρευμάτων είναι η μεταβολή της μαγνητικής ροής που δημιουργείται στο κλειστό επαγώγιμο κύκλωμα.**

Δεν πρέπει βέβαια να ξεχνάμε ότι, στα κλειστά κυκλώματα τα ρεύματα δημιουργούνται από κάποια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ). Στην περίπτωση, λοιπόν, του φαινομένου που εξετάζουμε

θα μπορούσαμε να πούμε ότι ανάμεσα στη μεταβολή της μαγνητικής ροής (αρχική αιτία) και στο επαγωγικό ρεύμα (αποτέλεσμα) παρεμβάλλεται η εμφάνιση κάποιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης, η οποία αποτελεί το άμεσο επακόλουθο της μεταβολής ροής αλλά και την άμεση αιτία του επαγωγικού ρεύματος.

Αυτό μπορούμε να το καταλάβουμε καλύτερα αν επαναλάβουμε όλα τα πειράματα αφήνοντας το επαγώγιμο κύκλωμα ανοικτό. Κατ' αυτό τον τρόπο, επαγωγικό ρεύμα δεν πρόκειται, βέβαια, να δημιουργηθεί. Χρησιμοποιώντας όμως ένα κατάλληλο όργανο, όπως ο παλμογράφος, μπορούμε σε κάθε περίπτωση να ανιχνεύσουμε την εμφάνιση μιας διαφοράς δυναμικού (επαγωγικής τάσης) που θα συνιστά και το μοναδικό αποτέλεσμα της μεταβολής της ροής. Η τάση αυτή μας μετράει την ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται στο κύκλωμα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι σε κάθε ανοικτό κύκλωμα με δύο άκρα η τάση που υφίσταται ανάμεσα σ' αυτά τα άκρα συμπίπτει με την ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Αυτή ακριβώς η εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης ως συνέπεια της μεταβολής της μαγνητικής ροής αποτελεί το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

Μεταβολή μαγνητικής ροής	⇒	Επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη	κλειστό κύκλωμα ⇒	Επαγωγικό ρεύμα

Ο ορισμός

Η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή είναι ένα φαινόμενο το οποίο, όπως όλα τα φαινόμενα, έχει συγκεκριμένη αιτία και συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Για να απαντήσουμε λοιπόν στο ερώτημα «*τι λέγεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή;*» μπορούμε να αποσαφηνίσουμε την αιτία και το αποτέλεσμα.

Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή λέγεται το φαινόμενο που έχει ως αιτία τη μεταβολή της μαγνητικής ροής σε μια μεταλλική σπείρα και ως αποτέλεσμα το ότι η σπείρα γίνεται πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Οι νόμοι

Ο νόμος Faraday

Ο Faraday δεν στάθηκε, όπως είπαμε, στην ανακάλυψη του φαινομένου της επαγωγής. Προχώρησε παραπέρα αναζητώντας και τους νόμους στους οποίους υπακούει το φαινόμενο. Κατάληξη των αναζητήσεών του ήταν η διατύπωση του λεγόμενου νόμου του Faraday, ή νόμου της επαγωγής.

Η επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη που αναπτύσσεται σε ένα κύκλωμα είναι ανάλογη προς τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που περνάει από αυτό το κύκλωμα.

Εφόσον η μεταβολή της μαγνητικής ροής σε μια σπείρα γίνεται με *σταθερό ρυθμό* ο νόμος μπορεί να διατυπωθεί με την εξίσωση $|E_{επ}| = κ|ΔΦ|/Δt$. Στο Διεθνές Σύστημα μονάδων η σταθερά αναλογίας (κ) είναι ίση με τον αριθμό «1», οπότε

$$|E_{επ}| = \frac{|ΔΦ|}{Δt}$$

Στην εξίσωση το ΔΦ παριστάνει τη μεταβολή που παρουσίασε η μαγνητική ροή σε μια σπείρα, τη διαφορά της τελικής τιμής της ροής μείον την αρχική. Το Δt παριστάνει τη χρονική διάρκεια κατά την οποία συνέβη η μεταβολή.

Εφόσον η ηλεκτρεγερτική δύναμη επάγεται σε πηνίο με «n» όμοιες σπείρες θα ισχύει:

$$|E_{επ}| = n\frac{|ΔΦ|}{Δt}$$

Στο πρώτο από τα πειράματα της δεύτερης σειράς διαπιστώσαμε ότι όσο πιο γρήγορα πλησιάζουμε ή απομακρύνουμε το μαγνήτη τόσο πιο μεγάλο ρεύμα θα δημιουργείται στο επαγώγιμο. Η διαπίστωση αποτελεί μια θετική ένδειξη για το ότι ισχύει ο νόμος που αναφέραμε, χωρίς βέβαια, να αποτελεί πειραματική απόδειξη.

Ακριβέστερα πειράματα με τα οποία μετράμε τον ρυθμό μεταβολής της ροής και την επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη, επιβεβαιώνουν τη μεταξύ τους αναλογία, επιβεβαιώνουν δηλαδή τον νόμο Faraday.

Στη γενική όμως, περίπτωση, κατά την οποία η επαγωγική ΗΕΔ από στιγμή σε στιγμή μεταβάλλεται, χρειάζεται να κάνουμε την αντιδιαστολή ανάμεσα σε στιγμιαία και σε μέση τιμή ταχύτητας μεταβολής ροής.

Η στιγμιαία επαγωγική ΗΕΔ είναι, σύμφωνα με τον νόμο, ανάλογη προς τον στιγμιαίο ρυθμό μεταβολής της ροής.

Ο κανόνας του Lenz

Στο πείραμα με τα δύο ακίνητα πηνία διαπιστώσαμε ότι κατά την αύξηση του ρεύματος του πρωτεύοντος επάγεται στο δευτερεύον ένα ρεύμα ορισμένης φοράς, ενώ, όταν ελαττώνεται το ρεύμα του πρωτεύοντος, στο δευτερεύον κύκλωμα επάγεται ένα ρεύμα αντίθετης φοράς. Στο πείραμα με τον μετακινούμενο μαγνήτη είδαμε ότι αν αντί για τον βόρειο πόλο πλησιάσουμε προς το πηνίο τον νότιο πόλο του, η φορά του επαγωγικού ρεύματος αναστρέφεται.

Ένα χρόνο μετά την ανακάλυψη του φαινομένου της επαγωγής και ενώ η θηριώδης ζωτικότητα του Faraday διοχετευόταν ήδη και προς άλλες δραστηριότητες το πρόβλημα της φοράς του επαγωγικού ρεύματος έμενε αναπάντητο. Το ερώτημα ήταν: *Υπήρχε άραγε κάποιος νόμος που επέβαλλε στα επαγωγικά ρεύματα τη μία ή την άλλη φορά;*

Στο μεταξύ η είδηση για το καινούργιο φαινόμενο είχε αρχίσει να συγκινεί αρκετούς Ευρωπαίους ερευνητές. Ανάμεσά τους ο γεννημένος στη Ρωσία Heinrich Friedrich Lenz (Χάινριχ Φρίντριχ Λεντς) και λίγο αργότερα ο Γερμανός Herman von Helmholtz (Χέρμαν φον Χέλμχολτς) συνέβαλαν ουσιαστικά στην εξέλιξη των γνώσεων για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.

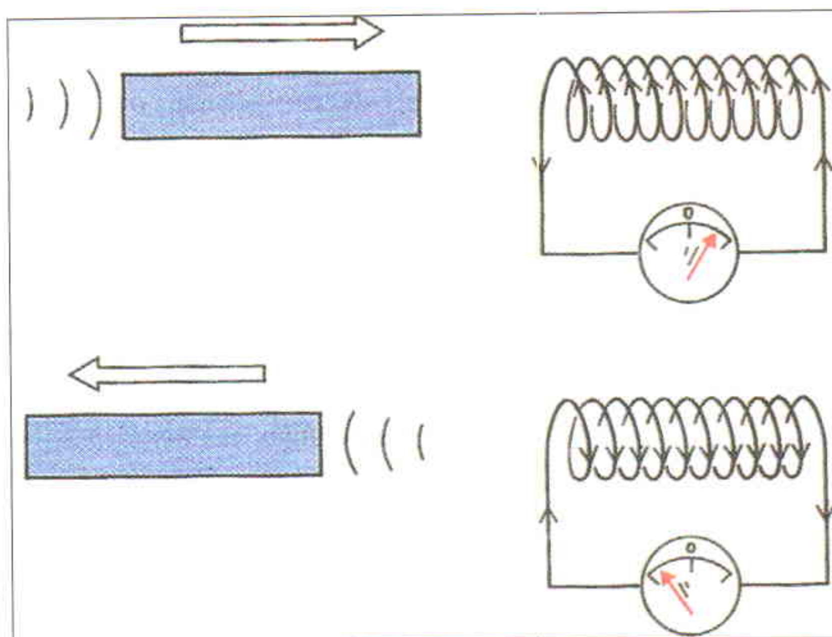
Στα 1834 ο Lenz πέτυχε μια σύντομη και καθαρή διατύπωση ενός κανόνα που μπορεί να μας δίνει τη φορά των επαγωγικών ρευμάτων σε κάθε περίπτωση.

Η φορά του επαγωγικού ρεύματος είναι τέτοια ώστε να προκύπτει αντίδραση στις αιτίες που το δημιούργησαν (Κανόνας του Lenz).

Η διατύπωση βέβαια του κανόνα δεν αρκεί για να τον κατανοήσουμε. Χρειάζεται καταρχήν να θυμηθούμε τη σχέση που έχει το ηλεκτρικό ρεύμα τόσο με τις αιτίες που το δημιουργούν όσο και με ορισμένα φαινόμενα που επηρεάζονται από τη φορά του. Τέτοια φαινόμενα είναι η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου του ρεύματος όσο και η γενικότερη αλληλεπίδραση του ρεύματος με μαγνήτες.

Ένα παράδειγμα. Στο σχετικό πείραμα της δεύτερης σειράς η προσέγγιση του μαγνήτη δημιουργεί στο πηνίο επαγωγικό ρεύμα και το πηνίο μετατρέπεται σε μαγνητικό δίπολο η πολικότητα του οποίου καθορίζεται από τη φορά του επαγωγικού ρεύματος. Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, η φορά του επαγωγικού ρεύματος είναι τέτοια ώστε η επίδραση του πηνίου-διπόλου στον μαγνήτη

που πλησιάζει προς αυτό να τείνει να αναιρέσει την προσέγγιση, την αιτία, δηλαδή δημιουργίας επαγωγικού ρεύματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο η επίδραση του πηνίου-διπόλου στο μαγνήτη εκδηλώνεται ως άπωση.



προσέγγιση του μαγνήτη ⇒ ΗΕΔ στο πηνίο ⇒ επαγωγικό ρεύμα ⇒ το πηνίο γίνεται μαγνητικό δίπολο τέτοιας πολικότητας που να αντιδρά στην προσέγγιση, στην αιτία δηλαδή του επαγωγικού ρεύματος

Μια σειρά, τέλος, από συλλογισμούς που περιέχουν στοιχεία φυσικής, γεωμετρίας και άλγεβρας μάς οδηγεί στο συμπέρασμα ότι

Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz το αλγεβρικό πρόσημο της επαγωγικής ΗΕΔ οφείλει να είναι αντίθετο από το πρόσημο της μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Η εξίσωση του νόμου του Faraday οφείλει τελικά να γράφεται με τη μορφή

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Επαγωγή και διατήρηση της ενέργειας

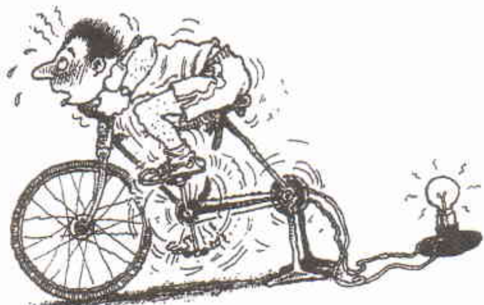
Λίγα χρόνια μετά την ανακάλυψη του φαινομένου, ο Helmholtz δημοσίευσε μια εργασία με την οποία έδειχνε ότι το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής μπορούσε να θεωρηθεί ως **συνέπεια της αρχής της διατήρησης της ενέργειας.**

Για να κατανοήσουμε τη λογική σύνδεση που πρότεινε ο Helmholtz, θα χρειαστεί να επιστρέψουμε στα προηγούμενα πειράματα.

1. Στο πρώτο από τα πειράματα της δεύτερης σειράς, καθώς πλησιάζουμε τον μαγνήτη στο πηνίο διαπιστώνουμε ότι πρέπει να εκτελέσουμε έργο, χρειάζεται μ' άλλα λόγια να μεταβιβάζουμε ενέργεια.

Σε αντίθετη περίπτωση θα είχαμε παραγωγή ενέργειας από το μηδέν.

Αποδεικνύεται μάλιστα ότι μπορούμε, βασιζόμενοι στη διατήρηση της ενέργειας, να οδηγηθούμε στον νόμο του Faraday.



Τα «καλά» κόποις κτώνται.

2. Επιστρέφουμε στο προηγούμενο πείραμα. Καθώς πλησιάζει ο μαγνήτης, το πηνίο γίνεται ρευματοφόρο, μετατρέπεται δηλαδή σε μαγνητικό δίπολο. Η φορά του επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος θα καθορίσει την πολικότητά του. Βασιζόμενοι στη διατήρηση της ενέργειας συμπεραίνουμε ότι η δύναμη που ασκεί το ρευματοφόρο πηνίο στο μαγνήτη πρέπει να αντιτίθεται στην προσέγγιση. Αυτό σημαίνει ότι η φορά του επαγωγικού ρεύματος «οφείλει» να είναι τέτοια ώστε το άκρο του πηνίου – διπόλου στο οποίο πλησιάζει ο βόρειος, λόγου χάριν, πόλος να λειτουργεί, ως βόρειος μαγνητικός πόλος.

Στο ίδιο όμως συμπέρασμα για τη φορά του επαγωγικού ρεύματος μας οδηγεί και ο κανόνας του Lenz.

Βλέπουμε λοιπόν ότι μπορούμε να προβλέψουμε τη φορά του επαγωγικού ρεύματος βασιζόμενοι είτε στην αρχή της διατήρησης της ενέργειας είτε στον κανόνα του Lenz. Αν μάλιστα λάβουμε υπόψη ότι η διατήρηση της ενέργειας είναι ένας γενικός νόμος που ισχύει για όλα τα φαινόμενα μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι *ο κανόνας του Lenz αποτελεί μια εξειδικευμένη διατύπωση της αρχής της διατήρησης της ενέργειας προσαρμοσμένη στο φαινόμενο ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.*

Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο δεν τον χαρακτηρίζουμε *νόμο, αλλά κανόνα.* Θυμίζουμε ότι κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τους δύο κανόνες του Kirchhoff.

Αυτεπαγωγή όχι

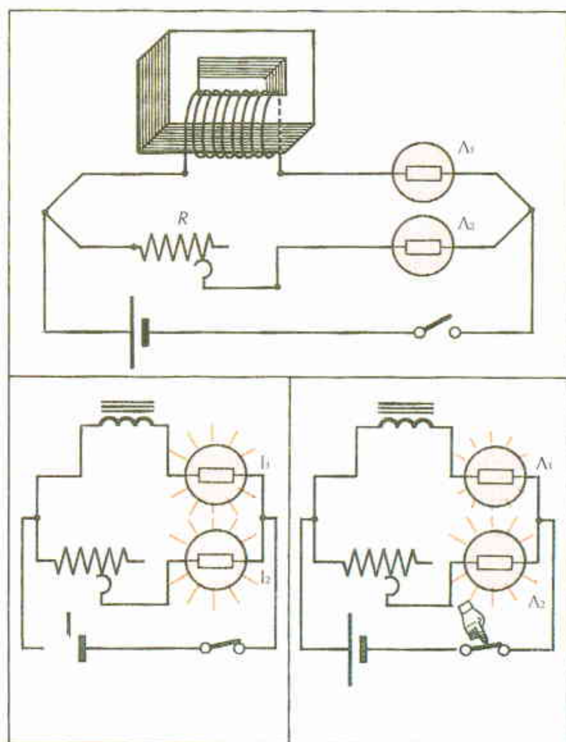
Η σκέψη και τα φαινόμενα

Κάθε ρευματοφόρο κύκλωμα βρίσκεται μέσα στο ίδιο το μαγνητικό πεδίο του. Κάθε μεταβολή του ρεύματος που το διαρρέει προκαλεί αντίστοιχη μεταβολή στο μαγνητικό αυτό πεδίο και στη μαγνητική ροή που περνάει από αυτό το ίδιο το κύκλωμα.

Η απλή αυτή σκέψη δημιουργεί εύλογα ένα ερώτημα· *«Ένα ρευματοφόρο κύκλωμα θα μπορούσε να δημιουργεί φαινόμενα επαγωγής στον ίδιο τον εαυτό του;»*, θα μπορούσε, δηλαδή, να παίζει συγχρόνως τον ρόλο επαγωγέα και επαγώγιμου; Η απάντηση που μας δίνει το πείραμα είναι καταφατική. Η οποιαδήποτε μεταβολή στο ρεύμα ενός κυκλώματος δημιουργεί φαινόμενο επαγωγής στο ίδιο το κύκλωμα, το οποίο λέγεται ειδικότερα **αυτεπαγωγή.**

Το πείραμα.

Με την ίδια πηγή συνεχούς τάσεως τροφοδοτούμε δύο λαμπτήρες παρόμοιους. Ο ένας ($Λ_1$) βρίσκεται σε σειρά με ροοστάτη και ο άλλος ($Λ_2$) σε σειρά με πηνίο κλειστού πυρήνα, όπως στο σχήμα. Ρυθμίζουμε τον ροοστάτη ώστε οι δύο κλάδοι να έχουν την ίδια αντίσταση και επιχειρούμε να κλείσουμε τον διακόπτη.



Κατά το κλείσιμο του διακόπτη παρατηρούμε ότι ο λαμπτήρας $Λ_2$ φωτοβολεί αμέσως ενώ ο $Λ_1$, καθυστερεί να φωτοβολήσει και η φωτοβολία του αυξάνει προοδευτικά. Το γεγονός φανερώνει ότι η παρουσία του πηνίου έχει σαν αποτέλεσμα το να καθυστερεί η αποκατάσταση της «τελικής» τιμής ρεύματος, αυτής δηλαδή που καθορίζεται από τον νόμο του Ohm.

Κατά το άνοιγμα του διακόπτη παρακολουθούμε ένα φαινόμενο εντυπωσιακό. Οι δύο λαμπτήρες δεν σβήνουν αμέσως αλλά διατηρούν τη φωτοβολία τους παρόλο που έχου-

με αποσυνδέσει την πηγή. Το ρεύμα, βέβαια, βαθμιαία μηδενίζεται. Και σ' αυτή λοιπόν την περίπτωση παρατηρείται καθυστέρηση στην αποκατάσταση της τελικής (μηδενικής) τιμής του ρεύματος. Αντικαθιστούμε το πηνίο με αντιστάτη και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από την αρχή. Διαπιστώνουμε ότι τα φαινόμενα της καθυστέρησης πρακτικά εξαφανίζονται.



Όταν εξαναγκάζουμε το ρεύμα να μηδενιστεί απότομα, δημιουργείται αυτεπαγωγική ΗΕΔ που μπορεί να είναι και επικίνδυνη. Ακόμα και σε ένα συνηθισμένο διακόπτη του σπιτιού είναι δυνατόν να προκληθεί σπινθήρας με απρόβλεπτα αποτελέσματα.

Γενικότερα. Το φαινόμενο *αυτεπαγωγή* δημιουργείται κάθε φορά που μεταβάλλεται το ρεύμα οποιουδήποτε κυκλώματος. Στο κύκλωμα εμφανίζεται αυτεπαγωγική ΗΕΔ, η οποία συμβάλλει στην τελική διαμόρφωση του ρεύματος. Το ρεύμα που θα εδημιουργείτο αν υπήρχε μόνο η αυτεπαγωγική ΗΕΔ, χαρακτηρίζεται *αυτεπαγωγικό*. Όταν αυξάνεται το ρεύμα του κυκλώματος, το αυτεπαγωγικό ρεύμα έχει αντίθετη φορά προς αυτό, τείνει δηλαδή να «αρνηθεί» την αύξηση. Όταν το ρεύμα του κυκλώματος ελαττώνεται, το αυτεπαγωγικό ρεύμα έχει την ίδια φορά προς αυτό, τείνει δηλαδή να μετριάσει την ελάττωση. Εννοείται ότι η συμπεριφορά του αυτή σημαίνει και «υπακοή» στον κανόνα Lenz.

Ορισμός

Αυτεπαγωγή λέγεται το φαινόμενο που έχει ως *αιτία* τη μεταβολή του ρεύματος σε μια σπείρα και ως *αποτέλεσμα* το ότι η σπείρα γίνεται πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.

Είναι φανερό ότι η αυτεπαγωγή είναι μία μορφή επαγωγής με το ιδιαίτερο στοιχείο ότι η πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι συγχρόνως και επαγώγιμο.

Πηνίο και αυτεπαγωγή

Το φαινόμενο της αυτεπαγωγής μπορεί να εκδηλωθεί σε έναν αγωγό οποιονδήποτε. Ειδικά, όμως, στα πηνία η εκδήλωσή του έχει μια

ιδιαίτερη ένταση. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας τα πηνία έχουν παίξει ένα σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ηλεκτρονικής. Μαζί με τους πυκνωτές συνυπάρχουν στα ραδιόφωνα, στις τηλεοράσεις αλλά και στους διάφορους ενισχυτές. *Οι πυκνωτές αποτελούν –όπως έχουμε πει– σημαντικές αποθήκες ηλεκτρικής ενέργειας. Εντελώς αντίστοιχα μπορούμε να πούμε ότι τα πηνία συνιστούν αποθήκες ενέργειας μαγνητικού πεδίου.*

Συντελεστής αυτεπαγωγής (ή επαγωγικότητα) ενός πηνίου. Η αυτεπαγωγική ΗΕΔ σχετίζεται με τη λεγόμενη αυτορροή, τη ροή δηλαδή του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από το ίδιο το ρεύμα του κυκλώματος. Πειράματα που έχουν γίνει με σύγχρονα όργανα δείχνουν ότι η «ολική»* αυτοροή ενός πηνίου είναι ανάλογη προς το ρεύμα που τη δημιουργεί. Ισχύει δηλαδή η σχέση:

$$\Phi_{ολ} = L \cdot I$$

στην οποία ο συντελεστής αναλογίας «L», το πηλίκο δηλαδή της «ολικής» ροής προς την ένταση του ρεύματος, λέγεται **συντελεστής αυτεπαγωγής** ή **επαγωγικότητα** του πηνίου.** Η επαγωγικότητα κάθε πηνίου αποτελεί και το βασικότερο στοιχείο της ταυτότητάς του. Εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του και τη μαγνητική διαπερατότητα του υλικού μέσα στο οποίο βρίσκεται.

Στο Διεθνές Σύστημα η μονάδα μετρήσεως της επαγωγικότητας ονομάζεται Henry (Χένρι) προς τιμήν του Αμερικανού φυσικού, ο οποίος ανακάλυψε, την ίδια περίπου εποχή με τον Faraday, το φαινόμενο της επαγωγής, μελέτησε την αυτεπαγωγή και λίγο αργότερα κατασκεύασε και τον πρώτο μετασχηματιστή. Η μονάδα συμβολίζεται με 1 Η. Ισχύει 1Η = 1Wb/1A = 1Ωs.

Επαγωγικότητα ενός σωληνοειδούς. Η επαγωγικότητα ενός οποιουδήποτε πηνίου δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί. Για την ειδική όμως περίπτωση που το πηνίο είναι σωληνοειδές μπορούμε να αποδείξουμε ότι $L = 4\pi k_{\mu} \mu S n^2/\ell$, όπου η ο αριθμός των σπείρων ℓ το μήκος, S το εμβαδόν διατομής και μ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού που βρίσκεται στο εσωτερικό του.

Αυτεπαγωγική ΗΕΔ στο πηνίο. Σύμφωνα με τον ορισμό της επαγωγικότητας θα ισχύει η ΔΦ = L ΔΙ οπότε ο νόμος της επαγωγής

---

* Με τον προσδιορισμό «ολική» δίνουμε έμφαση στο γεγονός ότι δεν πρόκειται για τη ροή που περνάει από μια σπείρα. Πρόκειται για τη ροή που περνάει από μια οποιαδήποτε επιφάνεια που έχει ως περίγραμμα το σύρμα του πηνίου.

** Αξίζει να σημειωθεί ότι όλοι οι αγωγοί έχουν κάποια επαγωγικότητα.

για την περίπτωση αυτεπαγωγής μπορεί να εκφράζεται με την εξίσωση:

$$E_{αυτ} = -L\frac{ΔI}{Δt}$$

με την οποία επισημαίνεται ότι η αυτεπαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη είναι ανάλογη προς την ταχύτητα μεταβολής του ρεύματος.

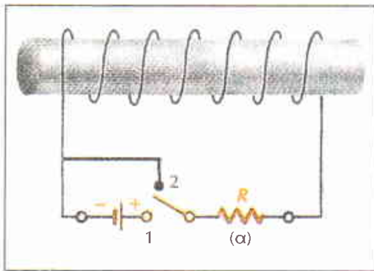
Η εξίσωση αυτή ισχύει εφόσον ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος είναι σταθερός.

Ενέργεια μαγνητικού πεδίου

Το πείραμα με τους δύο παρόμοιους λαμπτήρες μάς άφησε ορισμένα ερωτηματικά.

Κατά το κλείσιμο του διακόπτη παρατηρήσαμε καθυστέρηση στην «αποκατάσταση» του ρεύματος. Κατά τη μεταβατική κατάσταση το ρεύμα ήταν μικρότερο σε σχέση με το προβλεπόμενο από τον νόμο του Ohm. Η ανισότητα, όμως, αυτή, μάς παραπέμπει στο ότι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στις αντιστάσεις είναι λιγότερη από αυτήν που προσφέρει στον ίδιο χρόνο η πηγή. Που οφείλεται η διαφορά; Αυτό είναι το πρώτο ερώτημα.

Όταν ανοίξαμε το διακόπτη διαπιστώσαμε φωτοβολία των λαμπτήρων παρόλο που είχαμε αποσυνδέσει την ηλεκτρική πηγή. Από πού προερχόταν η ενέργεια που έκανε τους λαμπτήρες να φωτοβολούν; Αυτό είναι το δεύτερο ερώτημα.



Εφόσον πιστεύουμε στη διατήρηση της ενέργειας, η μόνη δυνατή απάντηση στα ερωτήματα είναι η εξής: **Κατά τη διάρκεια της αύξησης του ρεύματος το πηνίο αποθηκεύει ενέργεια, την οποία μπορεί και αποδίδει κατά τη διάρκεια της ελάττωσης του ρεύματος, οπότε και λειτουργεί ως γεννήτρια.** Θεωρούμε ότι η αποθήκευση γίνεται στο μαγνητικό πεδίο του με τη μορφή ενέργειας μαγνητικού πεδίου.

Η τιμή της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου (L) σε μία οποιαδήποτε στιγμή, δίνεται από την εξίσωση:

$$U = \frac{1}{2}LI^2$$

στην οποία το «I» παριστάνει την ένταση του ρεύματος εκείνη τη στιγμή.

Γενικότερα:

1. Κάθε πηνίο που διαρρέεται από σταθερό ρεύμα «διαθέτει» αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο του, η οποία διατηρείται αμετάβλητη. Η ηλεκτρική ενέργεια που του προσφέρεται εξ ολοκλήρου υποβαθμίζεται.

2. Η αποταμίευση ενέργειας γίνεται κατά τη φάση της αποκατάστασης του ρεύματος (από $I_1 = 0$ σε $I_2 = I$) οπότε δημιουργείται και το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος. Η δημιουργία λοιπόν μαγνητικού πεδίου συνδέεται με την αποταμίευση ενέργειας σ' αυτό.

Συνοψίζουμε

α. Κάθε φορά που εκδηλώνεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή υπάρχει

i) μια πηγή μαγνητικού πεδίου η οποία μπορεί να είναι είτε ρευματοφόρο κύκλωμα (αγωγός) είτε μαγνήτης.

και ii) ένα επαγώγιμο το οποίο είναι μια ή περισσότερες μεταλλικές σπείρες και γενικότερα ένας αγωγός.

β. Το φαινόμενο είναι δυνατόν να εκδηλωθεί με τρεις τρόπους.

1. Η πηγή του μαγνητικού πεδίου (μαγνήτης ή ρευματοφόρος αγωγός) κινείται ως προς το επαγώγιμο.

2. Η πηγή του μαγνητικού πεδίου (ρευματοφόρος αγωγός) κινείται ως προς το επαγώγιμο αλλά μεταβάλλεται το ηλεκτρικό ρεύμα που τη διαρρέει. Το φαινόμενο υπό αυτή τη μορφή λέγεται *αμοιβαία εισαγωγή*

3. Η πηγή του μαγνητικού πεδίου είναι συγχρόνως και επαγώγιμο. Το φαινόμενο υπό αυτή τη μορφή, λέγεται *αυτεπαγωγή*.

Η αξιοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής

ΟΧΙ

Γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος

Ένα συρματένιο πλαίσιο, το οποίο θέτουμε σε περιστροφή μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, αποτελεί το βασικό μοντέλο των μεγάλων γεννητριών της εποχής μας.

Σε ένα παρόμοιο μοντέλο βασίζεται, όπως ξέρουμε, και η λειτουργία του ηλεκτρικού κινητήρα. Ας εντοπίσουμε όμως τη διαφορά. Κατά τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα προσφέρουμε ρεύμα και παίρνουμε κίνηση, πράγμα που σημαίνει ότι η ενεργειακή διαδικασία την οποία επιδιώκουμε είναι **η μετατροπή της προσφερόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε ενέργεια μηχανική.** Η μετατροπή βασίζεται στη θεωρία των δυνάμεων Laplace. Ας μη μας διαφεύγει όμως ότι καθώς το στρεφόμενο πλαίσιο λειτουργεί ως κινητήρας λαμβάνει χώρα *και* μια αδιάκοπη μεταβολή της μαγνητικής ροής η οποία περνάει από αυτό. Εμφανίζεται, μ' άλλα λόγια, επαγωγική ΗΕΔ οι συνέπειες της οποίας τείνουν να παρεμποδίσουν την περιστροφή. Εμφανίζονται λοιπόν *και* τα δύο φαινόμενα (α) η επίδραση των δυνάμεων Laplace αλλά *και* (β) η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Το «ωφέλιμο» όμως φαινόμενο είναι το πρώτο από αυτά.

Όταν η ίδια διάταξη λειτουργεί ως γεννήτρια, το «ωφέλιμο» για μας φαινόμενο είναι η ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Προσφέρουμε την κίνηση και παίρνουμε επαγωγικά ρεύματα. Είναι προφανές ότι και σ' αυτή την περίπτωση εμφανίζονται δυνάμεις Laplace, οι οποίες όμως παρεμποδίζουν την περιστροφή και τις οποίες οφείλουμε να εξουδετερώνουμε ξοδεύοντας μηχανική ενέργεια. Όταν λοιπόν το πλαίσιο λειτουργεί ως γεννήτρια η ενεργειακή διαδικασία την οποία επιδιώκουμε είναι **η μετατροπή της προσφερόμενης μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια ηλεκτρική.**

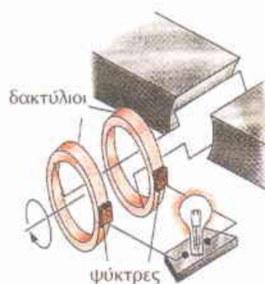
Καθώς το πλαίσιο στρέφεται με σταθερή συχνότητα και εφόσον, φυσικά, τα άκρα του συνδέονται με κλειστό κύκλωμα, το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται παρουσιάζει ορισμένες ιδιαιτερό-

τητες. Η τιμή του από στιγμή σε στιγμή μεταβάλλεται ενώ εμφανίζει και μια ορισμένη περιοδικότητα. Ανά ίσους, δηλαδή, χρόνους καθένας από τους οποίους (περίοδος) συμπίπτει με την περίοδο περιστροφής του πλαισίου, το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα αποκτά την ίδια τιμή. Μαζί όμως με αυτό παρουσιάζει κι ένα ακόμα γνώρισμα που το διαφοροποιεί από το συνεχές ρεύμα με το οποίο μέχρι τώρα ασχοληθήκαμε. *Δεν έχει μία ορισμένη φορά.* Μέσα σε κάθε περίοδο η φορά του αναστρέφεται σε δύο συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Κάθε ρεύμα με αυτά τα γνωρίσματα, χαρακτηρίζεται **εναλλασσόμενο.** Οι ιδιαιτερότητες του για αρκετές δεκαετίες του περασμένου αιώνα είχαν θεωρηθεί ως κάτι το μειονεκτικό. Κατά τα χρόνια όμως που ακολούθησαν αποδείχτηκε το αντίθετο. Το εναλλασσόμενο ρεύμα επεκράτησε εις βάρος του συνεχούς σ' ολόκληρο σχεδόν τον πλανήτη.

Ας επιστρέψουμε όμως στη λειτουργία της γεννήτριας. Καθένα από τα δύο άκρα του πλαισίου συνδέεται με ένα μεταλλικό δακτύλιο. Οι δύο δακτύλιοι χωρίς να βρίσκονται μεταξύ τους σε επαφή στρέφονται μαζί με το πλαίσιο ενώ ταυτόχρονα καθένας από αυτούς ακουμπάει πάνω σε ένα ακίνητο στέλεχος, τη λεγόμενη ψύκτρα. Οι δύο ψύκτρες αποτελούν τους πόλους της γεννήτριας.

Ας υποθέσουμε ότι θέτουμε το συρματένιο πλαίσιο σε περιστροφή με σταθερή συχνότητα γύρω από άξονα που ανήκει στο επίπεδό του και είναι κάθετος στις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Ας θεωρήσουμε ως αρχή των χρόνων τη στιγμή κατά την οποία το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές.

Εναλλασσόμενο ρεύμα ονομάζεται το ρεύμα του οποίου η τιμή και η φορά μεταβάλλονται περιοδικά.

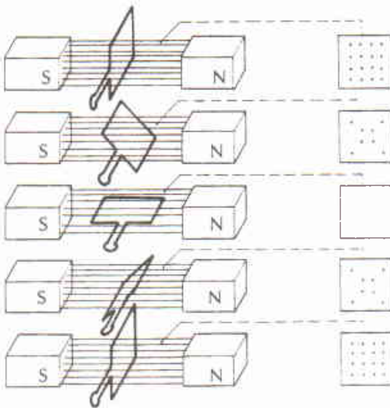


Κατά τη στιγμή εκείνη από την επιφάνειά του περνάει ο μέγιστος δυνατός αριθμός δυναμικών γραμμών.

Στη συνέχεια ο αριθμός αυτός παρουσιάζει μειώσεις και αυξήσεις, πράγμα που σημαίνει ότι επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη και συνακόλουθα, εφόσον το κύκλωμα είναι κλειστό, και ηλεκτρικό ρεύμα. Αποδεικνύεται ότι κάθε φορά που το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές η φορά του επαγόμενου ρεύματος αναστρέφεται.

Αυτό συμβαίνει δύο φορές σε κάθε περιστροφή. Στον χρόνο που παρεμβάλλεται ανάμεσα στις δύο αυτές στιγμές η τιμή του ρεύματος παρουσιάζει διακυμάνσεις, η περιγραφή των οποίων μπορεί να εξυπηρετηθεί καλύτερα από τη γλώσσα των μαθηματικών.

Αρμονικά εναλλασσόμενη τάση

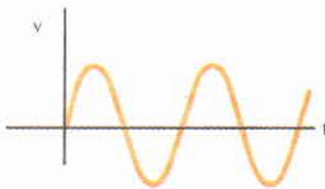


Καθώς περιστρέφεται το μεταλλικό πλαίσιο στις ψύκτρες της γεννήτριας εμφανίζεται επαγωγική τάση. Βάσει του νόμου του Faraday και με τη βοήθεια των μαθηματικών αποδεικνύεται ότι η στιγμιαία τιμή αυτής δίνεται από την εξίσωση.

$V = 2\pi\nu BS\eta\mu 2\pi\nu t$ όπου το B συμβολίζει το μαγνητικό πεδίο, το S το εμβαδόν του πλαισίου και το ν τη συχνότητα της περιστροφής.

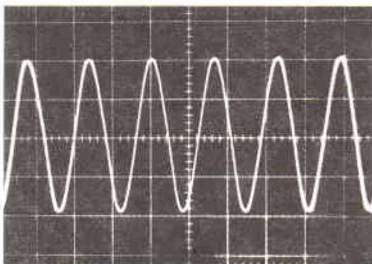
Το γινόμενο της συχνότητας επί τον αριθμό 2π λέγεται *κυκλική συχνότητα* και συντομογραφείται με το γράμμα ω. Η προηγούμενη, συνεπώς, εξίσωση γράφεται:

$$V = \omega BS\ \eta\mu\omega t$$



Βλέπουμε ότι η τιμή της επαγωγικής τάσης είναι ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου. Η γραφική παράσταση στιγμιαίας τάσης και χρόνου θα έχει τη μορφή της καμπύλης του σχήματος. Η «αρμονία» που παρουσιάζει η εικόνα αυτού του γραφήματος δικαιολογεί και το χαρακτηρισμό που χρησιμοποιούν οι μαθηματικοί γι' αυτή τη συνάρτηση λέγοντάς την «αρμονική».

Εναλλασσόμενη τάση ονομάζεται η τάση της οποίας η τιμή και η πολικότητα μεταβάλλονται περιοδικά.



Όσο για τους φυσικούς, αυτοί χαρακτηρίζουν την περιοδικά μεταβαλλόμενη αυτή τάση αρμονικά εναλλασσόμενη. Και χωρίς να χρησιμοποιούν τα μαθηματικά μπορούν και δημιουργούν την αρμονική εικόνα του γραφήματος, αξιοποιώντας τις δυνατότητες των ηλεκτρονικών παλμογράφων τους. Αυτό γίνεται με την απλή σύνδεση των πόλων της γεννήτριας με παλμογράφο στον οποίο έχουμε φροντίσει να βάλουμε κατάλληλη σάρωση.

Ας παρακολουθήσουμε τώρα με τη βοήθεια της γραφικής παράστασης $V = f(t)$ την εξέλιξη της εναλλασσόμενης τάσης κατά τη χρονική διάρκεια μιας περιόδου. Κατά το πρώτο τέταρτο η τάση αυξάνει από το μηδέν μέχρι τη μέγιστη τιμή της (BSω), η οποία λέγεται *πλάτος* V_0 της (αρμονικά) εναλλασσόμενης τάσης. Γράφουμε $V_0 = BS\omega$. Κατά το δεύτερο τέταρτο η τάση ελαττώνεται, ενώ κατά τη χρονική στιγμή $t = T/2$ – που το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμι-

κές γραμμές– η τιμή της μηδενίζεται. Αμέσως μετά, η τιμή της τάσης γίνεται αρνητική, πράγμα που για τους φυσικούς σημαίνει ότι αντιστράφηκε η πολικότητα. Διατηρώντας την αντίθετη αυτή πολικότητα σε όλη τη διάρκεια της δεύτερης ημιπεριόδου (T>t>T/2), η τάση εξελίσσεται ακριβώς όπως και κατά την πρώτη ημιπερίοδο, μέχρι τη στιγμή t = T οπότε και πάλι μηδενίζεται. Ο κύκλος έχει τώρα ολοκληρωθεί. Το φαινόμενο θα επαναληφθεί με τρόπο απόλυτα όμοιο.

Η περίοδος της μεταβολής όπως και το αντίστροφο μέγεθος **συχνότητα** αποτελούν μαζί με το **πλάτος** τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν μία εναλλασσόμενη τάση, τα στοιχεία δηλαδή βάσει των οποίων διακρίνεται από μία άλλη εναλλασσόμενη τάση διαφορετική. Ας σημειωθεί ότι στην προκειμένη περίπτωση η συχνότητά της είναι ίση με τη συχνότητα περιστροφής του συρματένιου πλαισίου.

Το γινόμενο ωt = 2πνt το οποίο από στιγμή σε στιγμή μεταβάλλεται λέγεται *φάση* της εναλλασσόμενης τάσης σε μια ορισμένη χρονική στιγμή. Κατά τη χρονική, λόγου χάριν, στιγμή T/4 η τιμή της φάσης θα είναι 2πνT/4 = π/2 ενώ κατά τη χρονική στιγμή T θα είναι 2πνT = 2π.

Ο όρος φάση χρησιμοποιείται σε όλα τα αρμονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη όπως είναι λόγου χάρη το αρμονικά εναλλασσόμενο ρεύμα και η ταχύτητα στην απλή αρμονική ταλάντωση. Φάση ενός τέτοιου μεγέθους είναι η γωνία το ημίτονο της οποίας εμφανίζεται στη χρονική συνάρτηση του μεγέθους αυτού.

Η εξίσωση της εναλλασσόμενης τάσης έχει τη μορφή

$$V = V_0 \, ημωt$$

εφόσον ως αρχή των χρόνων θεωρηθεί η χρονική στιγμή κατά την οποία η τάση (i) ήταν ίση με μηδέν (ii) επρόκειτο να ακολουθήσει η αλγεβρική της αύξηση.

Αρμονικά εναλλασόμενο ρεύμα

Αν η αρμονικά εναλλασσόμενη τάση εφαρμοστεί στα άκρα ενός αγωγού θα δημιουργηθεί εναλλασσόμενο ρεύμα της ίδιας με την τάση συχνότητας. Σε περίπτωση που ο αγωγός είναι ένας ωμικός αντιστάτης (R) θα μπορούμε να εφαρμόζουμε το νόμο Ohm για κάθε μία από τις στιγμιαίες τιμές τάσης-ρεύματος. Θα ισχύει δηλαδή:

$$I = \frac{V_0 ημωt}{R} \text{ ή } I = I_0 ημωt$$

Η μέγιστη τιμή I_0 (πλάτος) του ρεύματος και η συχνότητά του συνιστούν χαρακτηριστικά στοιχεία κάθε αρμονικά εναλλασσόμενου ρεύματος.

Ο επικρατέστερος διεθνής συμβολισμός για το εναλλασσόμενο

ρεύμα είναι ο AC. Προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων alternating current. Ο όρος σημαίνει εναλλασσόμενο ρεύμα.

Τα φαινόμενα

α. Το πείραμα Oersted μάς αποκάλυψε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Η παραπέρα έρευνα μάς έδειξε ότι το μαγνητικό αυτό πεδίο (i) εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος και (ii) έχει ένταση (B) ανάλογη προς την ένταση του ρεύματος από το οποίο προέρχεται.

Το σύμπερασμα που βγαίνει από όλα αυτά είναι ότι το (αρμονικά) εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο χρονικά μεταβαλλόμενο τόσο κατά το μέτρο της έντασης όσο και κατά την κατεύθυνση. Η ένταση του πεδίου αυτού θα δίνεται από μια σχέση της μορφής $B = B_0ημωt$, η οποία υποδηλώνει ότι το διάνυσμα $\vec{B}$ θα «πάλλεται» με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.

β. Τα θερμικά φαινόμενα που δημιουργούνται κατά τη διέλευση του ρεύματος είναι ανεξάρτητα από τη φορά του. Όταν ρευματοδοτήσουμε έναν αντιστάτη με εναλλασσόμενο ρεύμα συγκεκριμένων στοιχείων (I_o, ω), το ποσό θερμότητας το οποίο στη διάρκεια μιας περιόδου θα εκχωρήσει προς το περιβάλλον του (διατηρώντας τη θερμοκρασία του σταθερή), θα έχει μία ορισμένη τιμή. Ένα απόλυτα ίδιο αποτέλεσμα θα μπορούσε να προκληθεί και από ένα συνεχές ρεύμα ορισμένης έντασης με το οποίο θα τροφοδοτούσαμε τον ίδιο αντιστάτη επί την ίδια χρονική διάρκεια.

Σ' αυτήν ακριβώς τη σκέψη βασίζεται και ο ορισμός της αμέσως επόμενης έννοιας.

Ενεργός ένταση εναλλασσόμενου ρεύματος

Κάθε εναλλασσόμενο ρεύμα χαρακτηρίζεται από την ενεργό του ένταση. Η τιμή της μας βοηθάει να υπολογίζουμε τα ενεργειακά ποσά που ανταλλάσσει ένας ρευματοδοτημένος από το ρεύμα αυτό αντιστάτης με το περιβάλλον του. Ενεργός ένταση ($I_{εν}$) εναλλασσόμενου ρεύματος λέγεται η σταθερή ένταση ενός «υποθετικού» συνεχούς ρεύματος, το οποίο τροφοδοτώντας τον ίδιο αντιστάτη επί την ίδια χρονική διάρκεια θα είχε ως συνέπεια ο αντιστάτης να καταναλώνει το ίδιο ποσό ενέργειας.

Θεωρητικά η χρονική αυτή διάρκεια πρέπει να είναι ίση με μια περίοδο του ρεύματος ή με κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου αυτής. Στην πράξη, όμως, μπορεί να είναι μία οποιαδήποτε χρονική διάρκεια. Αυτό γιατί είναι τόσο μικρή η περίοδος ενός Ε.Ρ. που πρακτικά κάθε μετρήσιμη χρονική διάρκεια μπορεί να θεωρηθεί ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου.

Βλέπουμε ότι η λογική του ορισμού αυτού βασίζεται στον νόμο του Joule. Όταν συνεπώς ένας αντιστάτης (R) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενο ρεύμα το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβιβάζεται σ' αυτόν (και την οποία καταναλώνει) είναι ίσο με $I_{εν}^2 R$

Εξυπακούεται ότι (εφόσον η θερμοκρασία του αντιστάτη διατηρείται σταθερή) η ποσότητα αυτή θα μας δίνει και τη θερμότητα την οποία στον ίδιο χρόνο εκχωρεί στο περιβάλλον του.

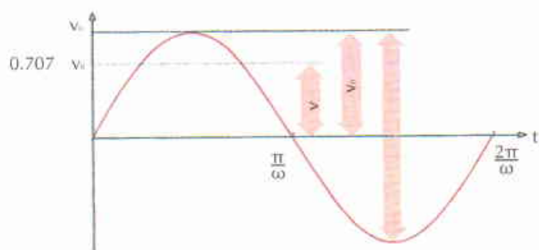
Η ανάλυση αποδεικνύει ότι η ενεργός ένταση του Ε.Ρ. συνδέεται με το πλάτος του (I_o) με την εξίσωση

$$\mathbf{I_{εν} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_o}$$

Η ενεργός ένταση μαζί με τη συχνότητα αποτελούν τα συνήθως αναφερόμενα ως «στοιχεία ταυτότητας» ενός εναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν λόγου χάριν λέμε ότι το τάδε ρεύμα είναι 10A, 50Hz εννοούμε ότι η ενεργός ένταση του είναι 10A οπότε το πλάτος του είναι 10√2A, ενώ η φορά αυτού του ρεύματος αναστρέφεται 100 φορές το δευτερόλεπτο.

Ενεργός τάση μιας εναλλασσόμενης τάσης

Μέσα από μία παρόμοια λογική ορίζουμε και την έννοια *ενεργός τάση* η οποία, μαζί με τη συχνότητα, συνθέτει την «ταυτότητα» μιας εναλλασσόμενης τάσης. Ο ορισμός της βασίζεται στην έννοια *ενεργός ένταση* και στον νόμο του Ohm.



Ας υποθέσουμε ότι διαθέτουμε μια εναλλασσόμενη τάση $V = V_0 ημωt$ την οποία έχουμε εφαρμόσει στα άκρα ενός αντιστάτη R με αποτέλεσμα την εμφάνιση εναλλασσόμενου ρεύματος $I = I_0 ημωt$ με ενεργό ένταση $I_{εν}$. Ως ενεργό τάση * της εναλλασσόμενης αυτής τάσης ορίζουμε μια «υποθετική» σταθερή τάση η

* Χρησιμοποιείται και ο όρος ενεργός τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης.

οποία αν εφαρμοζόταν στα άκρα του ίδιου αντιστάτη (R) θα προκαλούσε σταθερό ρεύμα έντασης ίσης με την παραπάνω $I_{εν}$.

Εύκολα συμπεραίνεται ότι $V_{εν} = I_{εν} \cdot R$ και επειδή $V_0 = I_0 R$ θα ισχύει

$$V_{εν} = \frac{V_0}{\sqrt{2}}$$

Λέγοντας ότι η ενεργός τιμή ($V_{εν}$) και η συχνότητα (ν) μιας αρμονικά εναλλασσόμενης τάσης μας δίνουν την «ταυτότητά» της, εννοούμε ότι τα δύο αυτά στοιχεία περιγράφουν αυτή την τάση επαρκώς. Από την ενεργό τιμή μπορούμε να υπολογίζουμε το πλάτος ενώ η τιμή της συχνότητας μάς επιτρέπει να υπολογίζουμε την περίοδο (T) και την κυκλική συχνότητα (ω). Λέγοντας, λόγου χάριν, ότι μία εναλλασσόμενη τάση είναι «220V, 50Hz» εννοούμε ότι η ενεργός τιμή της είναι 220 V, το πλάτος της $220\sqrt{2}V \simeq 311V$, η συχνότητα της $50Hz = 50s^{-1}$ και η περίοδος της $1/50^{s}$ πράγμα που σημαίνει ότι η τάση αυτή κάθε 1/100 του δευτερολέπτου αλλάζει πολικότητα.

Μια εναλλασσόμενη τάση με αυτή την ταυτότητα (220V, 50Hz) χρησιμοποιούμε κατά την καθημερινή μας ζωή μέσα στο σπίτι.

Μέση ισχύς

Είναι γνωστό ότι η στιγμιαία ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ένα τμήμα κυκλώματος είναι ίση με το γινόμενο της στιγμιαίας τιμής του ρεύματος επί τη στιγμιαία τιμή της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του.

Σε περίπτωση που το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα εναλλασσόμενο η ισχύς αυτή –ο στιγμιαίος δηλαδή ρυθμός προσφοράς ενέργειας– από στιγμή σε στιγμή μεταβάλλεται, έτσι ώστε ελάχιστο ενδιαφέρον να παρουσιάζει η στιγμιαία τιμή της από πρακτική τουλάχιστον άποψη.

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η λεγόμενη μέση ισχύς η οποία αναφέρεται σε κάποια χρονική διάρκεια και αποτελεί το πηλίκο της παρεχόμενης ενέργειας κατά τη χρονική αυτή διάρκεια προς την τιμή της χρονικής διάρκειας. Στο εναλλασσόμενο, όμως, ρεύμα η μέση ισχύς δεν προσδιορίζεται βάσει μιας οποιασδήποτε χρονικής διάρκειας γιατί σ' αυτή την περίπτωση θα αποτελούσε μέγεθος εξαρτώμενο από την επιλογή της χρονικής διάρκειας το οποίο δεν θα είχε καμιά λειτουργικότητα. Για τον ορισμό της μέσης ισχύος χρησιμοποιείται μόνο η συγκεκριμένη χρονική διάρκεια μιας περιόδου. *Μέση ισχύς* μεταβιβαζομένη σε ένα τμήμα κυκλώματος –στα άκρα του οποίου υπάρχει εναλλασσόμενη τάση– λέγεται το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας (W) η οποία μεταβιβάζεται στο τμήμα κυκλώ-

ματος σε χρόνο μιας περιόδου (T) προς το χρόνο αυτό.

Μπορούμε να γράψουμε:

$$\bar{P} = \frac{W}{T}$$

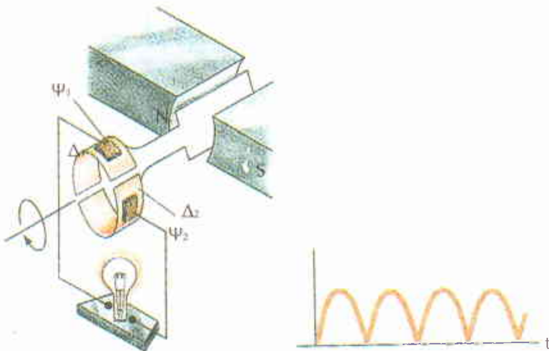
Ισχύς παρεχόμενη σε αντιστάτη. Εφόσον η εναλλασσόμενη τάση $V = V_0$ημωt εφαρμοστεί στα άκρα αντιστάτη, το ρεύμα θα είναι $I = I_0$ημωt οπότε η στιγμιαία ισχύς θα δίνεται από τη σχέση $P = V_0 I_0$ημ^{2}ωt.

Σ' αυτή την περίπτωση τα μαθηματικά μάς αποδεικνύουν ότι η μέση ισχύς, η μέση δηλαδή τιμή της ποσότητας $V_0 I_0$ημ^{2}ωt σε χρόνο μιας περιόδου, είναι ίση με το μισό της μέγιστης τιμής $V_0 I_0$. Είναι συνεπώς $\bar{P} = 1/2 V_0 I_0$ οπότε

$$\bar{P} = V_{εν} I_{εν}$$

Ρεύμα συνεχές και ρεύμα εναλλασσόμενο

Στα 1832 ο Ampére ανήγγειλε ότι ο συνεργάτης του κατασκευαστής οργάνων Hyppolyte Pixii (Ιππολύτ Πιξιί) είχε λύσει το πρόβλημα της παραγωγής συνεχούς ρεύματος μέσα από το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ο Pixii είχε επινοήσει τον λεγόμενο «συλλέκτη», μία ευφυέστατη διάταξη την οποία προσάρμοζε στο πλαίσιο της γεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος και κατάφερνε να δημιουργεί ρεύμα συνεχές.



Ο συλλέκτης αποτελείται από δύο μεταλλικούς ημιδακτύλιους. Κατά τη διάρκεια μιας ημιπεριστροφής οι ημιδακτύλιοι Δ1 και Δ2 του σχήματος βρίσκονται σε επαφή με τις ψήκτρες Ψ1 και Ψ2 αντίστοιχα. Κατά την επόμενη όμως ημιπερίοδο αλλάζει η «τάξη επαφής» πράγμα που σημαίνει ότι τώρα οι ημιδακτύλιοι Δ1 και Δ2 εφάπτονται με τις ψήκτρες Ψ2 και Ψ1 αντίστοιχα. Κατ' αυτόν τον τρόπο η πολικότητα της τάσης στις ψήκτρες διατηρείται σταθερή.

Η επινόησή του θεωρήθηκε ότι έλυνε ένα μεγάλο πρόβλημα γιατί κατά την εποχή εκείνη ήταν διάχυτη μεταξύ των μηχανικών η αντίληψη σύμφωνα με την οποία το εναλλασσόμενο ρεύμα ήταν κατάλληλο για τις πρακτικές εφαρμογές. Η αντίληψη αυτή διατηρήθηκε σαν ένα είδος πίστης για μισό αιώνα περίπου. Το συνεχές ρεύμα φαινόταν «κάπου να πηγαίνει», ενώ το εναλλασσόμενο δεν φαινόταν «να πηγαίνει πουθενά».

Η εικόνα αυτή η οποία τροφοδοτεί τη φαντασία των απλών ανθρώπων ακόμα και σήμερα είναι επηρεασμένη από το μηχανικό ανάλογο ενός ρεύματος νερού. Το νερό που τρέχει μέσα στους σωλήνες για να μας είναι χρήσιμο οφείλει «κάπου

να πηγαίνει» και να μπορεί να βγαίνει από το σωλήνα ώστε να το χρησιμοποιήσουμε για να πλύνουμε, να ποτίσουμε, να ξεδιψάσουμε και να σβήσουμε τη φωτιά. Η εικόνα αυτή προκειμένου για το ηλεκτρικό ρεύμα είναι λαθεμένη απόλυτα. Το ηλεκτρικό ρεύμα δεν βγαίνει έξω από τα σύρματα. Ακόμα και στην περίπτωση που είναι συνεχές, αυτό που συμβαίνει μέσα στο κύκλωμα δεν έχει καμία σχέση με το ότι «κάπου πηγαίνει» ή με το ότι «δεν πηγαίνει πουθενά».

Είναι βέβαια γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις –όπως λόγου χάριν όταν χρειαστεί να φορτίσουμε ένα συσσωρευτή– το συνεχές ρεύμα μάς είναι αναντικατάστατο. Από κει και πέρα όμως τα πλεονεκτήματα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι συντριπτικά περισσότερα, σε σημείο που η σε παγκόσμιο επίπεδο επικράτησή του να θεωρείται δικαιολογημένη και φυσιολογική.

Ποιο ακριβώς είναι όμως το βασικό πλεονέκτημα που παρουσιάζει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε σχέση με το συνεχές; Η απάντηση δεν είναι δύσκολη.

Το εναλλασσόμενο ρεύμα εμφανίζει ένα «προσόν» το οποίο δεν εμφανίζει το συνεχές. Μπορεί να μετασχηματίζεται. Ας δούμε τι ακριβώς εννοούν οι φυσικοί και οι ηλεκτρολόγοι με αυτόν τον «μετασχηματισμό».

Είναι γνωστό ότι η ηλεκτρική ισχύς (P) που παρέχεται σε ένα τμήμα κυκλώματος είναι ίση με το γινόμενο του ρεύματος (I) επί τη διαφορά δυναμικού (V) που εφαρμόζεται στα άκρα του.

$$P = VI^*$$

Υπάρχει δηλαδή μια ποικιλία συνδυασμών τάσεων (Volts) και ρευμάτων (Ampère) που μπορούν να μας δίνουν την ίδια ηλεκτρική ισχύ. Η ίδια ηλεκτρική ισχύς μπορεί να αποδοθεί σε ένα τμήμα κυκλώματος με τους συνδυασμούς 2A και 100V, 5A και 40V, 20A και 10V, όπως και 100A, 2V. Σ' όλες τις περιπτώσεις το γινόμενο θα είναι 200W.

Το να μεταβιβάζουμε μια ορισμένη ηλεκτρική ισχύ με «ψηλή τάση-μικρό ρεύμα» μας κάνει να αποφεύγουμε τις υπερβολικές θερμάνσεις των αγωγών. Η μεταβίβαση, πάλι, μέσα από «χαμηλή τάση-μεγάλο ρεύμα», μας εξυπηρετεί, στο να αποφεύγουμε τα «τρυπήματα» των διηλεκτρικών (μονωτών) και τα ενδεχόμενα βραχυκυκλώματα. Είναι, συνεπώς, ιδιαίτερα βολικό κατά τη μεταβίβαση ηλεκτρικής ενέργειας το **να μπορούμε να επιλέξουμε είτε «χαμηλές τάσεις-μεγάλα ρεύματα» είτε «ψηλές τάσεις-μικρά ρεύματα», ανάλογα με την περίπτωση.**

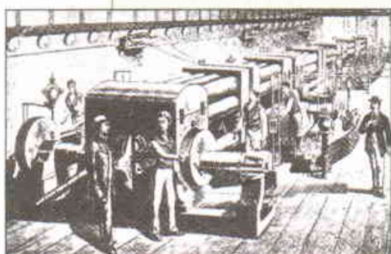
Σ' αυτό ακριβώς το ζήτημα, ενώ το συνεχές ρεύμα μειονεκτεί σοβαρά, το εναλλασσόμενο ρεύμα προσφέρεται. Υπάρχει **μια διάταξη**

---

* Στα παρακάτω και εφόσον το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο με τα σύμβολα V και I θα παριστάνουμε αντίστοιχα την ενεργό τιμή της τάσης και του ρεύματος.

Ο πόλεμος των δύο ρευμάτων

Στα 1880, πενήντα ολόκληρα χρόνια μετά την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, το πρόβλημα της επιλογής ανάμεσα σε ρεύμα συνεχές και ρεύμα εναλλασσόμενο δεν έχει ακόμα λυθεί. Ένας από τους περισσότερο ένθερμους υποστηρικτές του συνεχούς ρεύματος ήταν και ο μεγάλος Αμερικανός εφευρέτης Thomas Edison. Την εποχή εκείνη είχε ιδρύσει την εταιρεία Edison Electric Light η οποία είχε και το μονοπώλιο του ηλεκτροφωτισμού. Η εταιρεία αυτή η οποία αργότερα μετεξελίχθηκε, στη γνωστή σήμερα General Electric, είχε επενδύσει τότε τεράστια κεφάλαια προκειμένου να εφοδιάσει τις μεγάλες πόλεις της Αμερικής με δίκτυα διανομής συνεχούς ρεύματος. Ήταν απόλυτα φυσικό λοιπόν ο ιδρυτής της να ανησυχεί από τη διαφαινόμενη απειλή για την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος και να είναι φανατικός πολέμιος αυτού του είδους ρεύματος. Η απειλή προερχόταν από μια άλλη μεγάλη εταιρεία την Westinghouse Electric.



Σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εταιρείας του Edison με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος. Νέα Υόρκη, έτος 1882.

Η πρώτη πειραματική εγκατάσταση παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος έγινε το 1883 στο Παρίσι. Ένα χρόνο αργότερα λειτούργησε στην Ιταλία ένα παρόμοιο δίκτυο το οποίο τροφοδοτούσε μια μικρή περιοχή με ηλεκτρικό φωτισμό. Ο George Westinghouse, ιδρυτής της ομώνυμης εταιρείας και εφευρέτης με μεγάλο κύρος στην Αμερική, επισκέφθηκε την εποχή εκείνη την Ιταλία, είδε το καινούργιο πειραματικό δίκτυο και αγόρασε τα δικαιώματα για την αποκλειστική εκμετάλλευσή του στην Αμερική. Δύο χρόνια αργότερα στην πόλη Buffalo η εταιρεία του δημιούργησε το πρώτο δίκτυο εναλλασσομένου ρεύματος.

Ο πόλεμος ανάμεσα στους δύο τύπους ρεύματος είχε κηρυχθεί. Ήταν στην ουσία ένας πόλεμος για τα συμφέροντα δύο μεγάλων εταιρειών. Η έκβαση κρίθηκε δέκα περίπου χρόνια μετά. Για λόγους που σχετίζονται με την οικονομία, κατά την τελευταία δεκαετία του περασμένου αιώνα, το εναλλασσόμενο ρεύμα επεκράτησε οριστικά. Οι σταθμοί παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος και τα καινούργια δίκτυα μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας άρχισαν να πληθαίνουν και να τροφοδοτούν τα σπίτια και τα εργοστάσια, με ρεύμα εναλλασσόμενο, ενώ παράλληλα η σχετική τεχνολογία αναπτυσσόταν με ταχύτατους ρυθμούς.

που λειτουργεί μόνο με εναλλασσόμενο ρεύμα, η οποία μπορεί να μας μετασχηματίζει ένα συνδυασμό «τάσης-ρεύματος» σε έναν άλλο συνδυασμό, κατά τρόπον ώστε οι ενεργειακές απώλειες να είναι ασήμαντες. Η διάταξη λέγεται **μετασχηματιστής** και η λειτουργία της βασίζεται στο φαινόμενο **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή.**

Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από τον τόπο παραγωγής στους τόπους κατανάλωσης γίνεται με τα τέσσερα, συνήθως, παράλληλα χάλκινα σύρματα που συναντάμε στις πόλεις και στην ύπαιθρο. Τα σύρματα στηρίζονται στις γνωστές κολώνες της ΔΕΗ και φυσικά κάθε κομμάτι από αυτά παρουσιάζει κάποια ορισμένη αντίσταση. Αυτό σημαίνει ότι καθώς μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια, τα ρευματοφόρα σύρματα, λόγω φαινομένου Joule, θερμαίνονται. Εξυπακούεται ότι η ηλεκτρική ενέργεια την οποία καταναλίσκουν οι αγωγοί αυτοί, αποτελεί για το δίκτυο ενεργειακή απώλεια. Η ανά μονάδα χρόνου ενεργειακή απώλεια θα είναι $P_{απ} = I^2R$ όπου I το ρεύμα και R η αντίσταση των χάλκινων αγωγών.

Είναι φανερό ότι οι τιμές της αντίστασης και του ρεύματος απαιτείται να είναι μικρές για να περιορίζονται όσο είναι δυνατόν οι απώλειες. Μικρές όμως αντιστάσεις σημαίνει μεγάλες διατομές των αγωγών, μεγάλες δηλαδή ποσότητες χαλκού, πράγμα τελικά ασύμφορο. Χρειάζεται συνεπώς να επιδιώκουμε μικρά ρεύματα.

Για να μεταφερθεί ορισμένη ηλεκτρική ισχύς (P) με μικρό ρεύμα απαιτείται η μεταφορά της να γίνει με υψηλή τάση. Ισχύει $P = VI$. Αν, μάλιστα συνδυάσουμε την εξίσωση αυτή με την προηγούμενη, προκύπτει η $P_{απ} = P^2R/V^2$, η οποία εκφράζει ότι οι απώλειες ισχύος είναι αντίστροφα ανάλογες προς το τετράγωνο της τάσης με την οποία γίνεται η μεταφορά. Ένα παράδειγμα. Αν θελήσουμε να μεταφέρουμε ηλεκτρική ισχύ 300 kW με αγωγούς 150Ω υπό τάση 10kV οι απώλειες θα είναι 135kW. Στην αρχή της γραμμής θα έχουμε 300kW ενώ στον τόπο κατανάλωσης θα φθάνουν μόλις (300-135)kW =165kW. Αν όμως μεταφέρουμε **την ίδια ισχύ στην ίδια απόσταση και με τους ίδιους αγωγούς** αλλά υπό τάση 100kV, οι απώλειες θα είναι μόνο 1,35 kW. Στην κατανάλωση θα φθάνει ισχύς (300-1,35)kW = 298, 65kW.


Σύγχρονη εποχή

Η μεταφορά συνεπώς είναι οικονομικά συμφέρουσα, εφόσον πραγματοποιείται με τον συνδυασμό *ψηλή τάση-μικρό ρεύμα*. Ψηλές, όμως, τάσεις είναι πρακτικά

πολύ δύσκολο να δημιουργηθούν από τις γεννήτριες που διαθέτουμε. Εδώ ακριβώς παίζει το σημαντικό του ρόλο ο μετασχηματιστής.

Στον σταθμό ηλεκτροπαραγωγής δημιουργείται μια ορισμένη τάση την οποία ο μετασχηματιστής ανεβάζει σε μια τάση ψηλότερη με μικρές σχετικά απώλειες κατά τη λειτουργία του. Με την ψηλή αυτή τάση πραγματοποιείται η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας με μικρές απώλειες Joule τελικά.

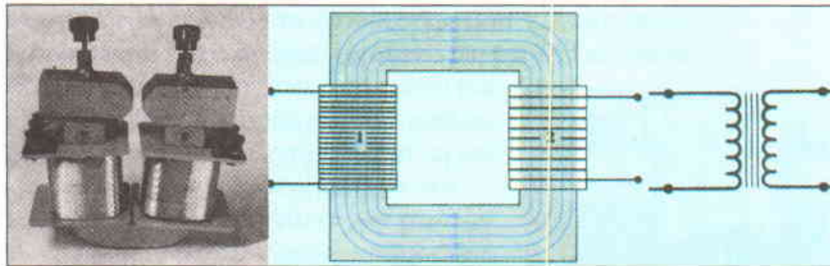
Στο άλλο άκρο της γραμμής μεταφοράς θα γίνει η κατανάλωση. Οι κινητήρες όμως της βιομηχανίας και ακόμα περισσότερο οι οικιακές ηλκετρικές συσκευές δεν είναι καθόλου πρακτικό αλλά και καθόλου «φρόνιμο» να λειτουργούν με τάσεις εκατοντάδων χιλιάδων βολτ. Και εδώ με αντίστροφο τρόπο παίζουν πάλι το ρόλο τους οι μετασχηματιστές, υποβιβάζοντας την ψηλή τάση σε τάση μερικών εκατοντάδων βολτ, υπό την οποία μεταβιβάζεται τελικά το «αγαθό» στα σπίτια και στα εργοστάσια.

Χωρίς εναλλασσόμενο ρεύμα όλο αυτό δε θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Ο μετασχηματιστής

Οι ρίζες της ανακάλυψης του μετασχηματιστή βρίσκονται στο σιδερένιο δακτύλιο του Faraday με τα δύο πηνία στα οποία παρατήρησε την αμοιβαία επαγωγή. Παρόλο που ο πρώτος μετασχηματιστής κατασκευάστηκε λίγα μόλις χρόνια αργότερα (1836) από τον Joseph Henry στην Αμερική, πέρασε μισός περίπου αιώνας μέχρις ότου χρησιμοποιηθεί στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας στα οποία παίζει μέχρι και σήμερα τον πολύ σημαντικό ρόλο του.

Περιγραφή. Η διάταξη αποτελείται από δύο πηνία τυλιγμένα στον ίδιο κλειστό σιδερένιο πυρήνα. Τα πηνία είναι από χάλκινο σύρμα με μονωτική επένδυση. Το ένα από αυτά, το οποίο θα χαρακτηρίζουμε ως *πρωτεύον*, τροφοδοτείται από πηγή εναλλασσόμενης τάσης (τάση εισόδου) ορισμένης συχνότητας. Στο άλλο πηνίο,

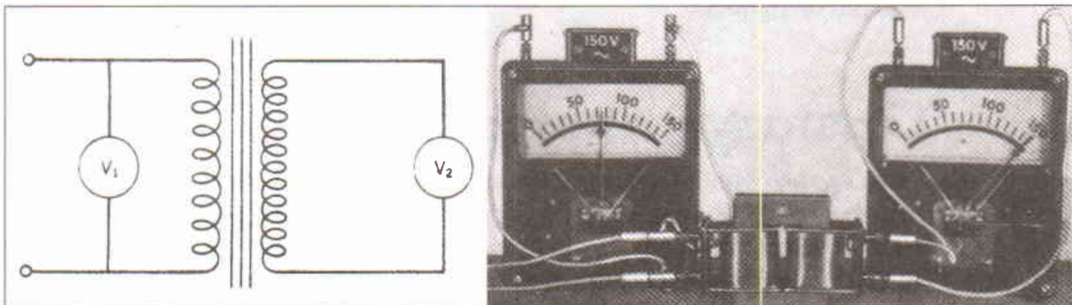


Η πραγματικότητα μέσα από φωτογραφία | Σχηματική παράσταση | Συμβολισμός

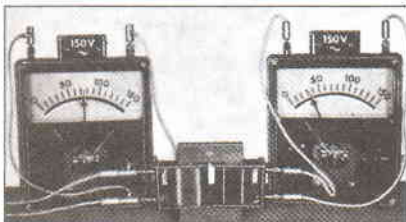
το λεγόμενο *δευτερεύον*, επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη και στα άκρα του εμφανίζεται εναλλασσόμενη τάση (τάση εξόδου) της ίδιας συχνότητας. Το δευτερεύον πηνίο συμπεριφέρεται ως γεννήτρια με χαρακτηριστικά (ηλεκτρεγερτική δύναμη και εσωτερική αντίσταση) διαφορετικά από τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά της πηγής που τροφοδοτεί το κύκλωμα του πρωτεύοντος.

Η γλώσσα της ενέργειας. Από ενεργειακή σκοπιά, ο μετασχηματιστής παίρνει ενέργεια από την πηγή που τροφοδοτεί το πρωτεύον πηνίο του. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας υφίσταται αναπόφευκτη υποβάθμιση καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα κυκλοφορεί στο πρωτεύον κύκλωμα. Το μεγαλύτερο όμως μέρος αποθηκεύεται στον χώρο του πυρήνα ως ενέργεια μαγνητικού πεδίου από όπου και μεταβιβάζεται στο δευτερεύον κύκλωμα.

Τα πειράματα. Οι σχετικές μετρήσεις δείχνουν ότι οι αριθμοί των σπειρών των δύο πηνίων καθορίζουν και τη σχέση ανάμεσα στις τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου.

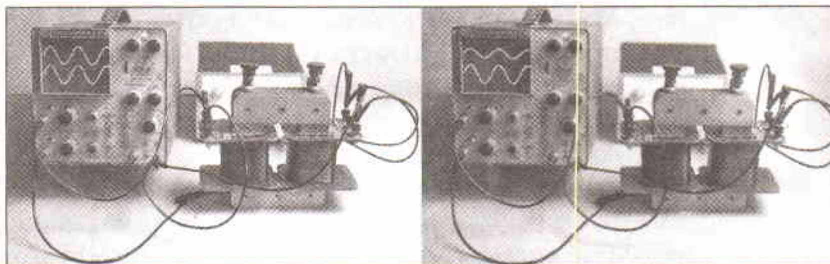


Πειραματιζόμαστε με ένα μετασχηματιστή το πρωτεύον του οποίου έχει n_1 = 600 σπείρες ενώ οι σπείρες του δευτερεύοντος είναι n_2 = 1.200. Τον τροφοδοτούμε με εναλλασσόμενη τάση ενεργού τιμής V_1 = 75V, οπότε ένα βολτόμετρο στα άκρα του δευτερεύοντος μάς δείχνει ότι η τάση εξόδου έχει (ενεργό) τιμή V_2 = 150V. Ο μετασχηματιστής μας ανύψωσε την τάση και μάλιστα σε τιμή διπλάσια από εκείνη που εφαρμόσαμε. Χρησιμοποιώντας έναν άλλο μετασχηματιστή με πρωτεύον 600 σπειρών και δευτερεύον 300 σπειρών διαπιστώσαμε ότι η τάση των 75V που εφαρμόσαμε υποβιβάστηκε περίπου στο μισό. Διαφαίνεται δηλαδή μια αναλογία ανάμεσα στις τάσεις εισόδου και εξόδου και στους αριθμούς των σπειρών των δύο πηνίων. Σε ανάλογα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε και με τη βοήθεια ηλεκτρονικού παλμογράφου.



Με τα σύμβολα V και I παριστάνουμε την ενεργό τιμή της εναλλασσόμενης τάσης και του εναλλασσόμενου ρεύματος αντίστοιχα.

Η θεωρία. Όταν στα άκρα του πρωτεύοντος ε-



Τα δύο πηνία έχουν τον ίδιο αριθμό σπειρών. Στον παλμογράφο φαίνεται ότι $V_2 = V_1$.

Οι αριθμοί σπειρών των δυο πηνίων έχουν λόγο $n_2/n_1 = 2$. Στον παλμογράφο φαίνεται ότι $V_2/V_1 = 2$.

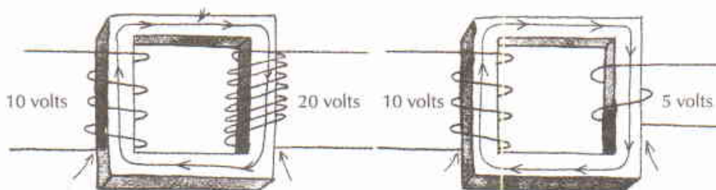
φαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση το κύκλωμά του διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα οπότε και εκδηλώνονται τα γνωστά φαινόμενα. Εμφανίζεται φαινόμενο Joule στους αγωγούς αυτού του κυκλώματος, ενώ ταυτόχρονα στο εσωτερικό κύρια του πηνίου δημιουργείται εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, οι δυναμικές γραμμές του οποίου διέρχονται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό, μέσω του σιδηροπυρήνα, και από το εσωτερικό του δευτερεύοντος. Αυτά σημαίνουν ότι (i) στο πρωτεύον πηνίο δημιουργείται αυτεπαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη ενώ στο δευτερεύον πηνίο επάγεται επίσης ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Ιδανικός μετασχηματιστής. Εφόσον κατά τη λειτουργία του δεν παρουσιάζονται απώλειες ενέργειας, ο μετασχηματιστής χαρακτηρίζεται ως ιδανικός. Στην πράξη, βέβαια, τέτοιος μετασχηματιστής δεν υφίσταται. Ο ιδανικός μετασχηματιστής είναι ένα μοντέλο μετασχηματιστή με πηνία χωρίς ωμική αντίσταση και με πυρήνα στον οποίο δεν δημιουργείται απώλεια ενέργειας. Όλη η μαγνητική ροή που εμφανίζεται στο πρωτεύον πηνίο διέρχεται και από το δευτερεύον.

Αποδεικνύεται θεωρητικά ότι σ' αυτή την περίπτωση ο λόγος των τάσεων εξόδων (V_1) και εισόδου (V_2), είναι ίσος με το λόγο των αριθμών (n_2 και n_1) των σπειρών.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_2}{n_1}$$

Η σχέση μας λέει ότι αν οι σπείρες του δευτερεύοντος είναι περισσότερες από τις σπείρες του πρωτεύοντος ο μετασχηματιστής θα ανυψώνει την εναλλασσόμενη τάση και μάλιστα τόσες φορές, όσες φορές ο αριθμός των σπειρών του δευτερεύοντος είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των σπειρών του πρωτεύοντος. Ο λόγος



n_2/n_1 λέγεται και *λόγος του μετασχηματισμού*. Σε αντίθετη περίπτωση ο μετασχηματιστής θα μπορεί να υποβιβάζει την τάση σύμφωνα πάντα με την αναλογία που αναφέραμε.

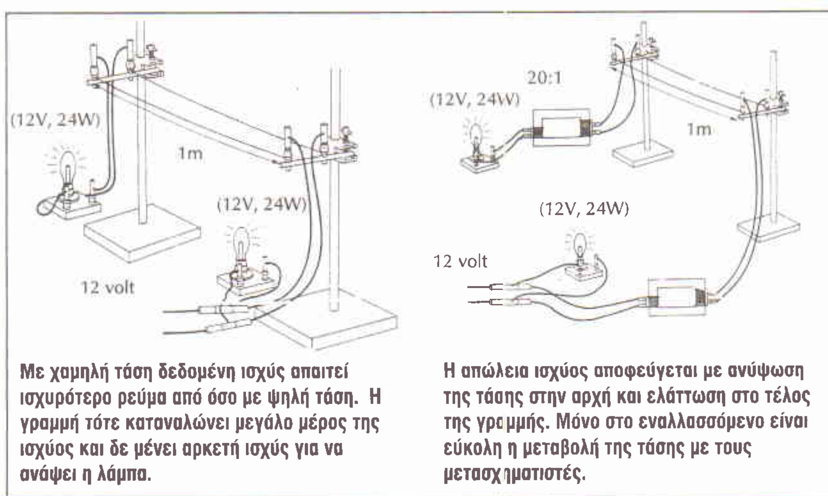
Εφόσον το κύκλωμα του δευτερεύοντος παραμένει ανοιχτό, η λειτουργία του μετασχηματιστή χαρακτηρίζεται *λειτουργία χωρίς φορτίο* ή *λειτουργία στο κενό*. Αν το κύκλωμα του δευτερεύοντος είναι κλειστό θα κυκλοφορεί σ' αυτό εναλλασσόμενο ρεύμα (I_2) και θα αποδίδεται κάποια ηλεκτρική ισχύς προ την «έξοδο». Τότε θα λέμε ότι ο μετασχηματιστής *λειτουργεί με φορτίο*. Σ' αυτή την περίπτωση –αναφερόμενοι πάντοτε στον ιδανικό μετασχηματιστή– θα έχουμε

μέση ισχύς εισόδου = μέση ισχύς εξόδου

$$V_1 I_1 = V_2 I_2$$

Πραγματικός μετασχηματιστής. Είναι όμως γνωστό ότι οι φυσικοί νόμοι δεν μας επιτρέπουν να δημιουργήσουμε μετασχηματιστή ιδανικό. Κατά τη λειτουργία του πραγματικού μετασχηματιστή οι ενεργειακές απώλειες θα υπάρξουν οπωσδήποτε. Οφείλονται κύρια στο φαινόμενο Joule που δημιουργείται (α) στις ωμικές αντιστάσεις των δύο πηνίων αλλά και (β) στον πυρήνα του μετασχηματιστή λόγω της δημιουργίας ειδικών επαγωγικών «δινορευμάτων» που δημιουργούνται σ' αυτόν. Για να περιορίζονται μάλιστα τα ρεύματα αυτά ο σιδερένιος πυρήνας δεν είναι ένας πυρήνας συμπαγής αλλά ένα σύνολο από σιδερένια «φύλλα» που διαχωρίζονται μεταξύ τους με λεπτά στρώματα μονωτικού υλικού.

Ο συντελεστής απόδοσης (α) ενός πραγματικού μετασχηματιστή, ο λόγος δηλαδή της ωφέλιμης ηλεκτρικής ισχύος εξόδου ($\bar{P}_2$) προς την παρεχόμενη ισχύ εισόδου ($\bar{P}_1$) είναι μικρότερος από τον αριθμό «1» και εξαρτάται από τις συνθήκες της λειτουργίας του.



Με χαμηλή τάση δεδομένη ισχύς απαιτεί ισχυρότερο ρεύμα από όσο με ψηλή τάση. Η γραμμή τότε καταναλώνει μεγάλο μέρος της ισχύος και δε μένει αρκετή ισχύς για να ανάψει η λάμπα.

Η απώλεια ισχύος αποφεύγεται με ανύψωση της τάσης στην αρχή και ελάττωση στο τέλος της γραμμής. Μόνο στο εναλλασσόμενο είναι εύκολη η μεταβολή της τάσης με τους μετασχηματιστές.

Ερωτήσεις και προβλήματα



4.1. Κατά τις αρχές του 19ου αιώνα
α) Ποια μειονεκτήματα παρουσίαζε η λειτουργία των μηχανών στα εργοστάσια;
β) Ποια προβλήματα παρουσίαζε η χρήση της ενέργειας του ατμού;
γ) Ποια αδυναμία παρουσίαζε η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας;

4.2. Κατά την πορεία του προς την ανακάλυψη του φαινομένου *ηλεκτρομαγνητική επαγωγή* ο Michael Faraday χρησιμοποίησε α) τη λογική του αντίστροφου και β) τη λογική της αναλογίας. Σας ζητούμε να αποσαφηνίσετε τι σημαίνει αυτό.

4.3. Πως είναι δυνατόν να δημιουργηθεί επαγωγικό ρεύμα αν ο επαγωγέας ακινητεί σε σχέση με το επαγώγιμο;

4.4. Περιγράψτε ένα πείραμα δημιουργίας επαγωγικού ρεύματος με τον επαγωγέα να κινείται σε σχέση με το επαγώγιμο.

4.5. Τι λέγεται ηλεκτρομαγνητική επαγωγή;

4.6. Πως διατυπώνεται ο νόμος του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή; α) Με λέξεις β) Με σύμβολα.

4.7. Διατυπώστε τον κανόνα του Lenz. Χρησιμοποιήστε ένα παράδειγμα.

4.8. Ποια είναι η σχέση του κανόνα του Lenz με την αρχή της διατήρησης της ενέργειας; Χρησιμοποιήστε ένα παράδειγμα.

4.9. Με πηγή συνεχούς τάσεως τροφοδοτούμε δύο παρόμοιους λαμπτήρες συνδεδεμένους παράλληλα ενώ παρεμβάλλεται και διακόπτης. Τι θα συμβεί κατά το άνοιγμα του διακόπτη; Σχεδιάστε το κύκλωμα.

4.10. Τι λέγεται αυτεπαγωγή; Δώστε ένα παράδειγμα.

4.11. Τι λέγεται συντελεστής αυτεπαγωγής; Σε τι αναφέρεται; Ποια είναι η μονάδα μετρήσεως;

4.12. Από ποια στοιχεία καθορίζεται η τιμή του συντελεστή αυτεπαγωγής ενός σωληνοειδούς;

4.13. Από τι εξαρτάται η τιμή της ηλεκτρεγερτικής δύναμης αυτεπαγωγής;

4.14. Κάτω από ποιες προϋποθέσεις ένα πηνίο αποθηκεύει ενέργεια;

4.15. Τι το ιδιαίτερο συμβαίνει με τον επαγωγέα και με το επαγώγιμο στην περίπτωση α) αμοιβαίας επαγωγής β) αυτεπαγωγής.

4.16. Περιγράψτε στη γλώσσα της ενέργειας τη λειτουργία α) μιας γεννήτριας β) ενός ηλεκτρικού κινητήρα.

4.17. Να δώσετε τους ορισμούς των εννοιών α) εναλλασσόμενο ρεύμα β) εναλλασσόμενη τάση γ) πλάτος μιας αρμονικά εναλλασσόμενης τάσης.

4.18. Τι λέγεται ενεργός ένταση εναλλασσόμενου ρεύματος; Σε τι μας βοηθά αυτή η έννοια; Ποια σχέση έχει η τιμή της με το πλάτος του (αρμονικά) εναλλασσομένου ρεύματος;

4.19. Τι λέγεται μέση ισχύς του εναλλασσόμενου ρεύματος;

4.20. Σε όλο τον κόσμο το εναλλασσόμενο ρεύμα έχει επικρατήσει εις βάρος του συνεχούς. Ποιος είναι ο βασικότερος λόγος γι' αυτό;

4.21. Σας ζητούμε να περιγράψετε α) έναν μετασχηματιστή β) τα φυσικά φαινόμενα

που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία του.

4.22. Τι το ιδιαίτερο συμβαίνει κατά τη λειτουργία ενός ιδανικού μετασχηματιστή;

4.23. Τι λέγεται απόδοση ενός μετασχηματιστή;



Να αναρωτηθούμε...

4.24. Πριν από την ανακάλυψη της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής
α) είχε εφευρεθεί η βολταϊκή στήλη
β) είχε δημιουργηθεί η ανάγκη μιας καινούριας ανακάλυψης η οποία θα προσέφερε ενέργεια ικανή να διανέμεται από τα κέντρα παραγωγής προς τους τόπους κατανάλωσης
γ) είχε εφευρεθεί η γεννήτρια εναλλασσομένου ρεύματος
δ) είχαν προηγηθεί ανεπιτυχείς προσπάθειες του Faraday να επάγει ηλεκτρικό ρεύμα σ' ένα κύκλωμα χρησιμοποιώντας ισχυρούς μαγνήτες.
Με ποιο από τα παραπάνω διαφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

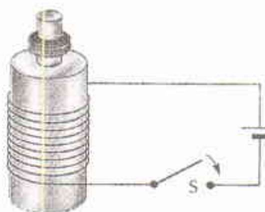
4.25. Δυο πηνία το Π_1 και το Π_2 βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο. Το Π_2 είναι ρευματοφόρο.
α) Αν μεταβληθεί το ρεύμα του πηνίου Π_2 το Π_1 θα γίνει πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
β) Αν μετακινηθεί το Π_2 και πλησιάσει προς το Π_1, το Π_1 θα γίνει πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
γ) Μόνο αν αυξηθεί το ρεύμα του Π_2 το Π_1 θα γίνει πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
δ) Είτε αυξηθεί το ρεύμα του Π_2, είτε μετακινηθεί το Π_2 προς το Π_1 χωρίς να αυξομειωθεί το ρεύμα του, το φαινόμενο λέγεται αμοιβαία επαγωγή.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

4.26. Πλησιάζουμε προς το ένα άκρο σωληνοειδούς τον νότιο πόλο ενός μαγνήτη, οπότε
α) Κάθε σπείρα του πηνίου γίνεται πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
β) Το πηνίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μόνο αν το κύκλωμα του πηνίου είναι κλειστό.
γ) Απαιτείται να μεταβιβάζουμε στον μαγνήτη ενέργεια μόνο αν το κύκλωμα είναι κλειστό.
δ) Αν το κύκλωμα είναι κλειστό το άκρο του πηνίου προς το οποίο πλησιάζουμε λειτουργεί ως βόρειος πόλος.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε; Δικαιολογήστε την απάντηση.

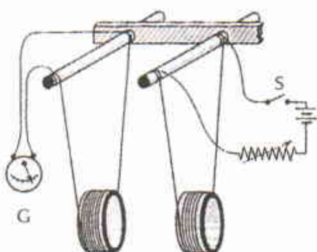
4.27. Μέσα σ' ένα διαστημόπλοιο που βρίσκεται σε τροχιά γύρω από τη Γη υπάρχει κάποιο πηνίο. Ένας αστροναύτης διαπιστώνει ότι το πηνίο διαρρέεται από ρεύμα παρόλο που δεν συνδέεται με ηλεκτρική πηγή. Που μπορεί να οφείλεται το ρεύμα αυτό;

4.28. Ο ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής έχει ως μονάδα μετρήσεως το α) 1V β) 1 W γ) 1Wb δ) 1Wb/s
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

4.29. Όταν κλείσουμε τον διακόπτη ο μεταλλικός δακτύλιος πετιέται προς τα πάνω (σχήμα). Γιατί συμβαίνει αυτό;



4.30. Τι θα συμβεί αν κλείσουμε τον διακόπτη;

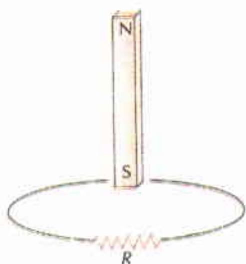


4.31. Ο νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (σε ένα πηνίο) διατυπώνεται με την εξίσωση

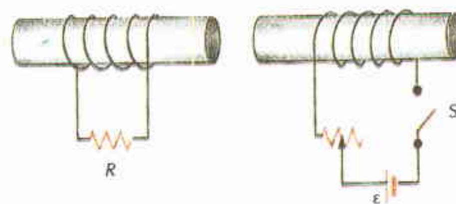
$$E_{επ} = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

α) Το σύμβολο $E_{επ}$ παριστάνει φυσικό μέγεθος με μονάδα μέτρησης το 1Α.
β) Το σύμβολο ΔΦ παριστάνει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής σε μια σπείρα.
γ) Η εξίσωση ισχύει εφόσον ο ρυθμός μεταβολής της ροής είναι χρονικά σταθερός.
δ) Το $E_{επ}$ παριστάνει την επαγωγική τάση στα άκρα του πηνίου εφόσον το κύκλωμα του πηνίου είναι ανοιχτό.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;

4.32. Πάνω σ' ένα τραπέζι βρίσκεται ένα κυκλικό πλαίσιο. Ακριβώς πάνω από το πλαίσιο συγκρατούμε ένα ραβδόμορφο μαγνήτη, όπως στο σχήμα.
Ποια θα είναι η φορά του επαγωγικού ρεύματος όταν ο μαγνήτης πλησιάζει το τραπέζι και ποια όταν απομακρύνεται από αυτό;



4.33. Προσδιορίστε τη φορά του ρεύματος που θα διαρρέει τον αντιστάτη R
α) τη στιγμή που κλείνουμε τον διακόπτη.
β) όταν ο διακόπτης είναι κλειστός και αυξάνουμε την τιμή της μεταβλητής αντίστασης
γ) τη στιγμή που ανοίγουμε τον διακόπτη.



4.34. Καθώς αυξάνεται η τιμή του ρεύματος που διαρρέει ένα σωληνοειδές
α) Εκδηλώνεται αυτεπαγωγή.
β) Αποθηκεύεται ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου.
γ) Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είναι σε κάθε χρονική στιγμή ομογενές.
δ) Κάθε σπείρα του γίνεται πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης.
ε) Εφόσον υπάρχει «κοντά» ένα άλλο πηνίο εκδηλώνεται αμοιβαία επαγωγή.
στ) Ο ρυθμός αύξησης του ρεύματος είναι χρονικά σταθερός.
Με ποια από αυτά συμφωνείτε;
Δικαιολογήστε την απάντηση.

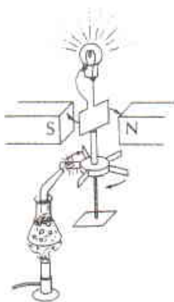
4.35. Η μονάδα μέτρησης του συντελεστή αυτεπαγωγής ενός πηνίου είναι α) Το 1Η β) Το 1Ω s γ) Το 1Wb/s.

4.36. Δύο σωληνοειδή έχουν το ίδιο εμβαδόν διατομής, το ίδιο μήκος και τον ίδιο πυρήνα αλλά το $Σ_1$ έχει διπλάσιες σπείρες από το $Σ_2$. Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του $Σ_1$ σε σχέση με εκείνον του $Σ_2$ α) είναι διπλάσιος β) είναι ίσος γ) είναι τετραπλάσιος.
Με ποιο από αυτά συμφωνείτε;

4.37. Κλείνουμε τον διακόπτη ενός κυκλώματος στο οποίο υπάρχει και πηνίο. Το ρεύ-

μα από μηδενική τιμή που έχει κατά τη στιγμή μηδέν φθάνει στην τιμή $I_1 = 120$ mA κατά τη στιγμή t_1 και αργότερα αποκτά την τιμή $I_2 = 240$ mA κατά τη χρονική στιγμή t_2. Η ενέργεια που έχει αποθηκευθεί στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου κατά τη στιγμή t_2 συγκρινόμενη με εκείνη που είχε αποθηκευθεί κατά τη στιγμή t_1
α) είναι διπλάσια β) είναι τετραπλάσια γ) είναι ίση.
Με ποιο από αυτά συμφωνείτε;

4.38. Ποιες είναι οι διαφορές και ποιες είναι οι ομοιότητες ανάμεσα σ' έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μια ηλεκτρική γενήτρια;



4.39. Περιγράψτε τη διαδικασία που παριστάνεται στο σχήμα, χρησιμοποιώντας και τη γλώσσα της ενέργειας.

4.40. Το ηλεκτρικό ρεύμα που χρησιμοποιείται σήμερα τόσο στα σπίτια όσο και στα εργοστάσια είναι .... ρεύμα, η τιμή και η .... του οποίου μεταβάλλονται .... Κάθε ηλεκτρικό ρεύμα αυτού του είδους χαρακτηρίζεται από την ενεργό τιμή του και από τη συχνότητά του. Αν η ενεργός τιμή του είναι .... το .... δηλαδή η .... τιμή του θα είναι .... Αν η .... του είναι .... η .... του θα είναι 1/50 του δευτερολέπτου, θα αλλάζει, δηλαδή, φορά κάθε ....
Σας ζητούμε να συμπληρώσετε τα κενά του κειμένου επιλέγοντας από τα παρακάτω:
ΑΡΜΟΝΙΚΑ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ • ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΟΥ • ΜΕΓΙΣΤΗ • 1/50 s • 4A • ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ • ΕΛΑΧΙΣΤΗ • ΣΥΝΕΧΕΣ • ΦΟΡΑ • 1/100 s • ΜΕΓΙΣΤΗ • $4\sqrt{2}$A • $2\sqrt{2}$A • ΑΣΥΝΕΧΕΣ • ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ • 50Hz • ΠΕΡΙΟΔΟΣ.

4.41. Ένας αντιστάτης 20Ω διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα 50 Hz η μέγιστη στιγμιαία τιμή του οποίου είναι 3A.
Με ποια από τα παρακάτω συμφωνείτε;
α) Στον αντιστάτη μεταβιβάζεται ενέργεια 45 J το δευτερόλεπτο.
β) Η εσωτερική θερμική ενέργεια του αντιστάτη αυξάνει - λόγω ρεύματος - κατά 45 J το δευτερόλεπτο.
γ) Η ενεργός ένταση του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι $3\sqrt{2}$ A.

4.42. Πως συμπεριφέρεται από ενεργειακή σκοπιά ένα πηνίο όταν διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα;

4.43. Σε έναν ιδανικό μετασχηματιστή οι σπείρες στο πηνίο του δευτερεύοντος είναι 10 φορές περισσότερες από εκείνες στο πηνίο του πρωτεύοντος.
α) Αν στο πρωτεύον εφαρμόσουμε συνεχή τάση 20 V η τάση στο δευτερεύον θα είναι 200 V
β) Αν στο πρωτεύον μεταβιβάσουμε 5000 J ανά δευτερόλεπτο η ισχύς στην έξοδο θα είναι 5000 W.
γ) Αν στο πρωτεύον μεταβιβάσουμε 6000 W υπό τάση 200 V το ρεύμα του δευτερεύοντος θα είναι 30 A.
Με ποια απ' αυτά συμφωνείτε;

4.44. Ορισμένοι θεωρούν το μετασχηματιστή ως «ηλεκτρικό μοχλό». Ποια είναι η αναλογία ανάμεσα σε ένα μετασχηματιστή και σε ένα μοχλό;

Να λύσουμε προβλήματα

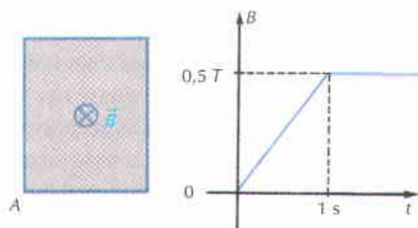


4.45. Σε κάποιο κύκλωμα η μαγνητική ροή αυξάνει σταθερά κατά 2.10^{-2}Wb σε χρόνο 1/100 του δευτερολέπτου. Υπολογίστε την ΗΕΔ από επαγωγή.

4.46. Ένας κυκλικός αγωγός με διάμετρο 50 cm τοποθετείται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με το επίπεδό του κάθετο στις δυναμικές γραμμές. Αν η ένταση του πεδίου αυξάνει με σταθερό ρυθμό 0,4T ανά δευτερόλεπτο να υπολογίσετε την επαγωγική τάση που αναπτύσσεται μεταξύ των σημείων A και B.

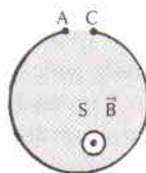


4.47. Ένα μεταλλικό πλαίσιο εμβαδού 20 cm² τοποθετείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο του οποίου η ένταση μεταβάλλεται όπως στο διάγραμμα. Προσδιορίστε την τιμή της επαγωγικής ΗΕΔ και τη φορά του επαγωγικού ρεύματος.



4.48. Το επίπεδο ενός ορθογωνίου πλαισίου, διαστάσεων 10cmx8cm, είναι κάθετο στην διεύθυνση ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Αν το πλαίσιο αποτελείται από 50 σπείρες και έχει αντίσταση 12 Ω, υπολογίστε το ρυθμό με τον οποίο πρέπει να μεταβάλλεται η ένταση του μαγνητικού πεδίου ώστε το πλαίσιο να διαρρέεται από ρεύμα 5mA.

4.49. Θεωρούμε μια σπείρα κάθετα τοποθετημένη σε ομογενές μαγνητικό πεδίο $\vec{B}$. Αυξάνουμε γραμμικά την τιμή της έντασης από



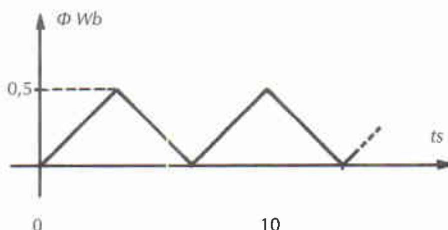
0 σε 0,1 Τέσλα σε χρόνο 1/10 του δευτερολέπτου. Στη συνέχεια μηδενίζουμε κατά τον ίδιο τρόπο την ένταση του πεδίου σε χρόνο 1/10 του δευτερολέπτου. Δίνεται ότι το εμβαδόν επιφανείας της σπείρας είναι 10 cm².

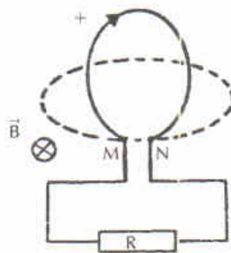
α) Η σπείρα είναι ανοιχτή. Βρείτε την τάση V_{AC}.

β) Η σπείρα είναι κλειστή και η αντίσταση της είναι 0,5 Ω. Φτιάξτε τη γραφική παράσταση ρεύματος-χρόνου.

γ) Πόσο είναι το ηλεκτρικό φορτίο που μετακινήθηκε σε κάθε περίπτωση;

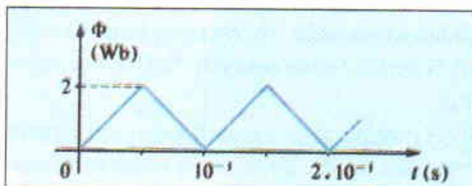
4.50. Η μαγνητική ροή που διαπερνά ένα κύκλωμα μεταβάλλεται σύμφωνα με το διάγραμμα (Φ,t). Να γίνει η γραφική παράσταση της τιμής της επαγόμενης ΗΕΔ σε συνάρτηση με το χρόνο.





4.51. Ένας κυκλικός αγωγός διαμέτρου 20 cm και αντίστασης r= 0,01 Ω συνδέεται με αντιστάτη R=0,02 Ω όπως στο σχήμα. Ο αγωγός τοποθετείται κάθετα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο 0,8 T. Μέσα σε 1/10 του δευτερολέπτου το εμβαδόν της επιφάνειας του κυκλικού αγωγού μειώνεται σταθερά σε 10 cm². Ζητείται α) η ΗΕΔ από επαγωγή β) το ηλεκτρικό φορτίο που επάγεται.

4.52. Στο σχήμα παριστάνεται γραφικά η χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής Φ(t) που περνάει από ένα πηνίο. Υπολογίστε την ΗΕΔ από επαγωγή και παραστήσετε γραφικά τη μεταβολή της σε συνάρτηση με το χρόνο.



4.53. Το ρεύμα που διαρρέει ένα πηνίο είναι 6A. Η επαγωγικότητα (συντελεστής αυτεπαγωγής) του πηνίου είναι 0,1H. Υπολογίστε α) την αποθηκευμένη στο πηνίο ενέργεια και β) τη μέση ισχύ με την οποία απελευθερώνεται όταν το ρεύμα μηδενίζεται μέσα σε 1/40 του δευτερολέπτου.

4.54. Αυτεπαγωγή και καράτε. Ο σπεσιαλίστας του καράτε καταφέρνει με ένα κατάλληλο χτύπημα να σπάσει διάφορα αντικείμενα. Με το χτύπημά του απελευθερώνει ένα σημαντικό ποσό ενέργειας σε χρόνο πολύ μικρό. Η ισχύς την οποία αναπτύσσει μπορεί να συγκριθεί με την ισχύ που απελευθερώνεται κατά το άνοιγμα ενός κυκλώματος με πηνίο και ηλεκτρική πηγή. Με τα παρακάτω δεδομένα μπορείτε να το επαληθεύσετε. Θεωρήστε τη μάζα της παλάμης 200 g, την ταχύτητα του χτυπήματος 15m/s και το χρόνο του χτυπήματος 0,1 s. Κάνετε τη σύγκριση με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Το κύκλωμα περιέχει πηνίο επαγωγικότητας 0,5H, διαρρεόμενο από ρεύμα 10A, ο μηδενισμός του οποίου γίνεται σε χρόνο 0,1s.



4.55. Ένα σωληνοειδές 500 σπειρών διαρρέεται από ρεύμα 10A. Στο εσωτερικό του σωληνοειδούς το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος είναι $1{,}5.10^{-2}$T. Υπολογίστε την επαγωγικότητα και το μήκος του σωληνοειδούς αν είναι γνωστό ότι το εμβαδόν διατομής κάθε σπείρας είναι 40 cm^2.

4.56. Στα άκρα ενός πηνίου με L=30mH και R = 4 Ω εφαρμόζεται σταθερή τάση 40V. Κλείνουμε το διακόπτη παροχής ρεύματος. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται, σε κάποια χρονική στιγμή η έντασή του είναι 2A. Κατά τη στιγμή εκείνη υπολογίστε (α) την παρεχόμενη στο πηνίο ηλεκτρική ισχύ, (β) την ισχύ που καταναλώνεται στην ωμική αντίσταση, (γ) το ρυθμό αποταμίευσης ενέργειας στο μαγνητικό πεδίο του πηνίου, (δ) την ενέργεια που έχει ήδη αποταμιευτεί.

4.57. Ένα ορθογώνιο μεταλλικό πλαίσιο έχει 100 σπείρες καθεμιά από τις οποίες έχει εμβαδόν 400 cm^2. Το πλαίσιο βρίσκεται σε ομογενές μαγνητικό πεδίο 0,5T και στρέφεται με σταθερή συχνότητα 20Hz περί άξονα ο οποίος ανήκει στο επίπεδό του και είναι κάθετος στις δυναμικές γραμμές. Αν κατά την αρχή των χρόνων το πλαίσιο είναι κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου, υπολογίστε την επαγόμενη σ' αυτό ηλεκτρεγερτική δύναμη κατά τις χρονικές στιγμές 1/160 s και 1/16 s.

4.58. Μια εναλλασσόμενη τάση έχει ενεργό τιμή 220V και συχνότητα 50Hz. Υπολογίστε τη στιγμιαία τιμή της κατά τις χρονικές στιγμές 1/400 s και 1/200 s αν είναι γνωστό ότι κατά την αρχή των χρόνων η τιμή της είναι ίση με μηδέν.

4.59. Στα άκρα ενός αντιστάτη 10 Ω εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση με «στοιχεία ταυτότητας» 220V και 50 Hz. Υπολογίστε: (α) το πλάτος της έντασης του ρεύματος και (β) τη μέση ισχύ που καταναλώνει ο αντιστάτης.

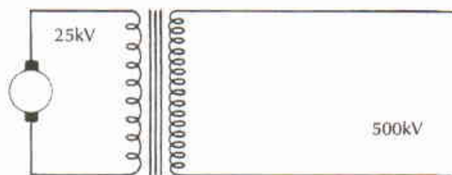
4.60. Στα άκρα ενός αντιστάτη εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση με εξίσωση $V = 200\sqrt{2}\eta\mu 100\pi t$, στην οποία τα σύμβολα V και t παριστάνουν τις αριθμητικές τιμές στιγμιαίας τάσης και χρόνου στο Διεθνές Σύστημα. Η μέση ισχύς που καταναλώνει ο αντιστάτης είναι 110 W. Ζητείται α) η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης, β) η ενεργός ένταση του ρεύματος, και γ) η τιμή της αντίστασης.

4.61. Οι σωλήνες φωτισμού *Νέον* απαιτούν τάση 12100V για τη λειτουργία τους. Χρειάζονται λοιπόν ένα μετασχηματιστή. Ποιος πρέπει να είναι ο λόγος μετασχηματισμού αυτού του μετασχηματιστή για να λειτουργήσει ένας τέτοιος σωλήνας στο δίκτυο των 220 V; Θεωρήστε τον μετασχηματιστή ιδανικό.

4.62. Για να λειτουργήσει κάποιο ηλεκτρικό τραινάκι χρειάζεται τάση 6V. Στα σπίτια μας διαθέτουμε τάση 220V. Είναι φανερό ότι και σ' αυτή την περίπτωση χρειάζεται μετασχηματιστής. Θεωρήστε το μετασχηματιστή ιδανικό και υποθέστε ότι το ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο του είναι 0,25A. Πόσο θα είναι το ρεύμα στο δευτερεύον;

4.63. Η απόδοση ενός μετασχηματιστή που υποβιβάζει την τάση είναι 100%. Τα δύο πηνία του έχουν 5.000 και 500 σπείρες αντίστοιχα. Ο μετασχηματιστής τροφοδοτείται με 600 W ενώ στην έξοδο τροφοδοτεί αντίσταση 100 Ω.
Ζητείται το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης στο πρωτεύον και οι τιμές των ενεργών εντάσεων των ρευμάτων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος.

4.64. Μια γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοτεί, με την παρεμβολή μετασχηματιστή, μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο μετασχηματιστής ανυψώνει την τάση από 25 kV σε 500 kV και εμφανίζει απόδοση 95%. Οι ωμικές αντιστάσεις των πηνίων του θεωρούνται ασήμαντες.
Ζητείται η εκατοστιαία αύξηση που θα παρουσιάσει σε απώλειες Joule η γραμμή μεταφοράς αν δεν παρεμβληθεί ο μετασχηματιστής.



4.65. Μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτεί μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με την παρεμβολή μετασχηματιστή ο οποίος ανυψώνει την τάση. Η γεννήτρια παρέχει στον μετασχηματιστή 500 kW υπό τάση 200 V. Ο λόγος μετασχηματισμού του μετασχηματιστή είναι 100 και η απόδοσή του 100%. Στο τέλος της γραμμής μεταφοράς η τάση υποβιβάζεται με έναν άλλο μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού 1/80 και απόδοση 100%, το δευτερεύον του οποίου τροφοδοτεί ένα καταναλωτή υπό τάση 200 V. Υπολογίστε α) την απώλεια ισχύος στη γραμμή μεταφοράς και β) τη συνολική απόδοση της εγκατάστασης.



Ντοκουμέντο

Απόσπασμα από το βιβλίο «Διαλέξεις του R. Feynman πάνω στη Φυσική»

Όταν ο Faraday δημοσίευσε την εκπληκτική του ανακάλυψη ρωτήθηκε: «Σε τι χρησιμεύει;». Όλο κι όλο το εύρημά του συνοψιζόταν στο αξιοπερίεργο γεγονός ότι όταν μετακινούσε ένα σύρμα κοντά σε ένα μαγνήτη μπορούσε να παράγει ένα ανεπαίσθητο ηλεκτρικό ρεύμα. Ποια θα μπορούσε να είναι η πιθανή χρησιμότητα αυτού του ευρήματος; Η απάντηση που έδωσε ήταν: «Ποια χρησιμότητα έχει ένα νεογέννητο βρέφος»;

Αναλογιστείτε όμως τις τρομακτικές πρακτικές εφαρμογές στις οποίες οδήγησε αυτή η ανακάλυψη. Ωστόσο είναι μακρύς ο δρόμος από τις βασικές αρχές μέχρι τις πρακτικές και οικονομικές εφαρμογές του. Απαιτείται εξονυχιστική μελέτη και προσεκτικός μηχανολογικός σχεδιασμός, για να φθάσουμε από ένα τέτοιο εύρημα στην πραγματοποίηση μιας υδροηλεκτρικής εγκατάστασης σαν το Μπώλντερ για παράδειγμα. Τι είναι το φράγμα Μπώλντερ; Ένας τεράστιος ποταμός φράζεται με ένα τοίχο από μπετόν αρμέ. Αλλά τι τοίχος! Σχηματισμένος σε μια τέλεια καμπύλη που είναι τόσο προσεκτικά σχεδιασμένη ώστε με την ελάχιστη δυνατή ποσότητα μπετόν να συγκρατεί ένα ποτάμι ολόκληρο. Στη βάση παχαίνει μ' αυτό το θαυμάσιο σχήμα που εκστασιάζει τους καλλιτέχνες, αλλά για τους μηχανικούς είναι απλή συμμόρφωση στη γνώση. Αυτοί γνωρίζουν ότι η πάχυνση είναι απολύτως αναγκαία για να αντιμετωπιστεί η αύξηση της πίεσης του νερού με το βάθος. Ξεφύγαμε, όμως από τον ηλεκτρισμό.

Το νερό του ποταμού διοχετεύεται σ' έναν τεράστιο σωλήνο που είναι ένα ακόμα θαυμαστό μηχανολογικό επίτευγμα. Ο σωλήνας τροφοδοτεί με νερό έναν υδροτροχό –ένα γιγάντιο υδροστρόβιλο– που τον περιστρέφει. Αλλά γιατί να περιστρέφονται τροχοί; Γιατί έτσι αλληλεπιδρούν με έναν τελειότατο «πλεκτό» από σιδερένιες μάζες και χάλκινα συνεστραμμένα σύρματα. Όλα αυτά χωρίζονται σε δύο μέρη, ένα στρεφόμενο και ένα ακίνητο. Μια πολύπλοκη ανάμιξη λίγων υλικών, ως επί το πλείστον χαλκός και σίδηρος αλλά και μονωτικά, βερνίκι και κάμποσο χαρτί. Ένα στρεφόμενο θηριώδες κατασκεύασμα. Μια γεννήτρια. Από κάποια σημεία αυτού του χαλκοσιδερένιου λαβύρινθου βγαίνουν μερικές λάμες χάλκινες. Το φράγμα, ο στρόβιλος, ο χαλκός, ο σίδηρος, όλα συναρμολογημένα με σκοπό να συμβεί ένα ειδικό γεγονός σε κάποιες λάμες χάλκινες. Ηλεκτρεγερτική δύναμη.

Στη συνέχεια οι χάλκινες λάμες γίνονται σύρματα που τυλίγουν με μερικές βόλτες ένα άλλο σιδερένιο κομμάτι που βρίσκεται λίγο παραπέρα, τον πυρήνα ενός μετασχηματιστή. Η δουλειά τους τελειώνει εδώ.

Γύρω όμως από το ίδιο σιδερένιο κομμάτι τυλίγεται ένα άλλο χάλκινο καλώδιο που δεν έχει καμιά απολύτως «επαφή» με τις λάμες που έρχονται από τη γεννήτρια. Και σ' αυτό επάγεται ηλεκτρεγερτική δύναμη επειδή βρίσκεται κοντά. Ο μετασχηματιστής μετατρέπει την ισχύ από τις χαμηλές τάσεις στις πολύ ψηλές τάσεις που είναι απαραίτητες για την οικονομική μεταβίβαση της ηλεκτρικής ενέργειας με μακριά καλώδια. Κάθε τι πρέπει να είναι αποδοτικό στο έπακρο. Δεν επιτρέπεται σπατάλη και απώλεια. Γιατί; Γιατί ολόκληρη η ισχύς που κινεί μια μεγαλούπολη διοχετεύεται εκεί. Αν ένα μικρό ποσοστό, ένα, δύο στο εκατό, χαθεί, αναλογιστείτε πόση ενέργεια εγκαταλείπεται. Αν ένα στα εκατό της ισχύος παραμένει στο

μετασχηματιστή, πολύ σύντομα θα τον θερμάνει και θα λιώσει όλο το κατασκεύασμα. Η θερμότητα θα πρέπει να απομακρύνεται οπωσδήποτε. Θα υπάρχει, φυσικά, κάποια απώλεια, αλλά τόση που φθάνουν μερικές αντλίες που κυκλοφορούν ψυκτικό λάδι μέσα σ' έναν εναλλάκτη θερμότητας για να εμποδίζουν την υπερθέρμανση.

Μερικές δωδεκάδες χάλκινες ράβδοι βγαίνουν από το φράγμα και συνεχίζουν με μακριά χάλκινα καλώδια που διασχίζουν εκατοντάδες χιλιόμετρα προς κάθε κατεύθυνση. Λεπτές ράβδοι από χαλκό που μεταφέρουν την ισχύ ενός μεγάλου ποταμού. Ύστερα τα σύρματα διαμοιράζονται σε λεπτότερα σύρματα, σε πρόσθετους μετασχηματιστές, μερικές φορές σε μεγάλες γεννήτριες που ξαναδημιουργούν ρεύμα άλλης μορφής, σε μηχανές που κινούν μεγάλα βιομηχανικά συγκροτήματα, σε νέους μετασχηματιστές, ύστερα νέος διαχωρισμός και εξάπλωση, ώσπου στο τέλος **το ποτάμι διαμοιράζεται μέσα σε μια ολόκληρη μεγαλούπολη περιστρέφοντας κινητήρες θερμαίνοντας, φωτίζοντας, ενεργοποιώντας μικροσυσκευές. Το θαύμα των ζεστών φώτων που τα 'χει ανάψει το ψυχρό ποτάμι που βρίσκεται μίλια μακριά.** Όλα δημιουργημένα με προσεκτικά διευθετημένα κομμάτια σιδήρου και χαλκού. Μεγάλοι κινητήρες για την ελασματοποίηση του χάλυβα ή μικροσκοπικοί κινητήρες για τον τροχό του οδοντογιατρού. Χιλιάδες μικροί τροχοί που γυρίζουν σε ανταπόκριση με το στρεφόμενο μεγάλο τροχό του φράγματος. Αν σταματήσει ο μεγάλος τροχός θα σταματήσουν όλοι οι άλλοι τροχοί. Εξαρτώνται από αυτόν. Πραγματικά συνδέονται.

Συμβαίνουν κι άλλα πράγματα. Τα ίδια φαινόμενα που παίρνουν την τρομακτική δύναμη του ποταμού και την διασκορπίζουν στην ύπαιθρο, μέχρι που μερικές σταγόνες του ποταμού να γυρίζουν τον τροχό του οδοντίατρου, τα ίδια φαινόμενα ξαναεμφανίζονται σε ρόλους διαφορετικούς, στη λειτουργία εξαιρετικά λεπτών οργάνων, για την ανίχνευση απίστευτα μικρών ρευμάτων, για τη μετάδοση φωνών, μουσικής, εικόνων, για ηλεκτρονικούς υπολογιστές, για αυτόματες μηχανές φανταστικής ακρίβειας. Όλα αυτά γίνονται πραγματικότητα χάρη σε προσεκτικά σχεδιασμένα σύνολα σιδήρου και χαλκού, δημιουργία ισχυρών μαγνητικών πεδίων, σιδερένια κομμάτια με δύο μέτρα διάμετρο που στροβιλίζονται πλάι σε ακίνητα κομμάτια σε απόσταση ενός μόλις χιλιοστού, προσεγμένες διαστάσεις χαλκού για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης,· παράδοξα σχήματα, όλα στην υπηρεσία κάποιου σκοπού, όπως και η καμπύλη του φράγματος.

Αν κάποιος αρχαιολόγος του μέλλοντος ανασκάψει το φράγμα μαντεύουμε ότι θα θαυμάσει την ομορφιά των γραμμών του. Αλλά και οι ερευνητές κάποιων μελλοντικών τεχνολογικών πολιτισμών θα αντικρίζουν τις σημερινές γεννήτριες και θα ανακράζουν «Προσέξτε ότι το κάθε κομμάτι σίδερο έχει πανέμορφα εξοικονομημένο σχήμα. Αναλογιστείτε τη σκέψη που βρίσκεται επενδυμένη σε κάθε κομμάτι χαλκού».

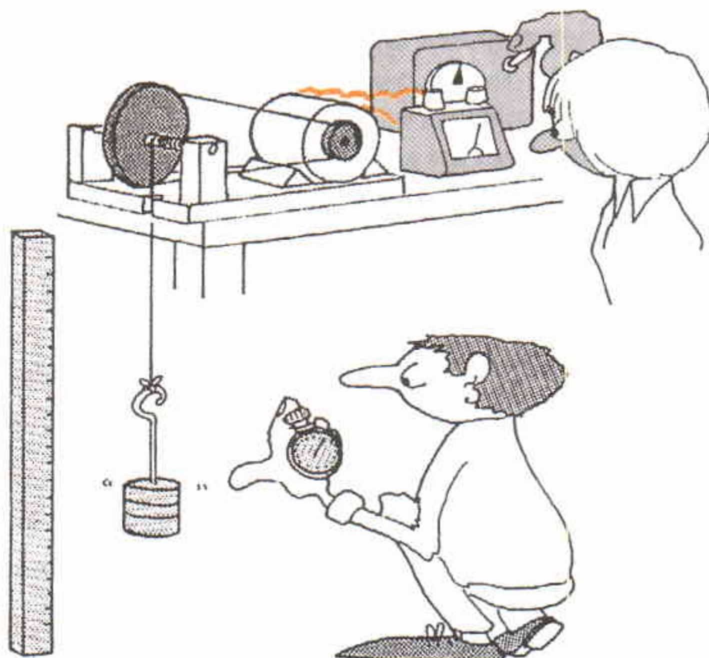
Αυτή είναι η δύναμη της τεχνικής και του προσεκτικού σχεδιασμού της ηλεκτρικής τεχνολογίας μας. Μέσα στη γεννήτρια έχει δημιουργηθεί κάτι που δεν υπάρχει αλλού στη φύση, πουθενά. Βέβαια στη φύση υπάρχουν φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Είναι βέβαιο ότι σε ορισμένες θέσεις γύρω από τον ήλιο και τους απλανείς συμβαίνουν τέτοια φαινόμενα. Είναι επίσης πιθανό –αλλά και όχι βέβαιο– ότι το γήινο μαγνητικό πεδίο διατηρείται χάρη σε κάτι ανάλογο. Με «γεννήτρια» που προκαλεί την κυκλοφορία ρευμάτων στο εσωτερικό της Γης. Πουθενά όμως δεν υπάρχουν συναρμολογημένα κομμάτια με κινούμενα τμήματα για τη δημιουργία ηλεκτρικής ισχύος, όπως γίνεται στη γεννήτρια. Με τόσο μεγάλη κανονικότητα και αποδοτικότητα.

Ίσως θα νομίσετε ότι ο σχεδιασμός ηλεκτρικών γεννητριών δεν αποτελεί πλέον ένα ενδιαφέρον αντικείμενο, ότι είναι ένα τελειωμένο ζήτημα μια και η τελειότητα έχει φθάσει σε έ-

ναν τέτοιο βαθμό. Τέλειες σχεδόν γεννήτριες και τέλειοι κινητήρες βρίσκονται «στο ράφι» ετοιμοπαράδοτοι. Υπάρχουν όμως ένα σωρό ατέλειωτα προβλήματα. Ακόμα και οι γεννήτριες και οι κινητήρες ξαναεμφανίζονται ως προβλήματα. Φαίνεται ότι ολόκληρο το πεδίο έρευνας των χαμηλών θερμοκρασιών και των υπεραγωγών θα μπει γρήγορα σε εφαρμογή στη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Με ένα ριζικά νέο παράγοντα στο πρόβλημα, νέες αριστοποιημένες κατασκευές θα πρέπει να δημιουργηθούν. Τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας του μέλλοντος ίσως να έχουν ελάχιστη μόνο ομοιότητα με τα σημερινά.

Η σημερινή ηλεκτρική τεχνολογία άρχισε με την ανακάλυψη του Faraday. Το χωρίς αξία βρέφος εξελίχθηκε σε έναν υπερφυσικό γίγαντα που άλλαξε το πρόσωπο της Γης σε σημείο που ο περήφανος πατέρας του ποτέ δε θα μπορούσε να το φανταστεί.

Να κάνουμε πειράματα



Α' μέρος

Εργαστηριακές ασκήσεις

• Το ηλεκτρικό φορτίο άγεται • Εικόνες με αόρατες δυναμικές γραμμές • Θέρμανση χωρίς θερμότητα (φαινόμενο Joule) • Ανακρίνοντας μια ηλεκτρική στήλη • Ο μαγνήτης επιδρά σε ρευματοφόρο αγωγό • Ο ρευματοφόρος αγωγός επιδρά σε μαγνητική βελόνα • Αντιστέκεται στην αιτία που το δημιουργεί

Εργαστηριακή άσκηση 1

Το ηλεκτρικό φορτίο άγεται

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Ο λόγος για τον οποίο κάνουμε αυτή την άσκηση είναι για να συνδυάσουμε τις παρατηρήσεις μιας έμπρακτης δρατηριότητας με αφηρημένες έννοιες της φυσικής και να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι η οντότητα *ηλεκτρικό φορτίο*
α) εμφανίζεται με δύο πρόσωπα, το θετικό και το αρνητικό και β) άγεται μέσα από καλώδια.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Καθώς τρίβουμε ένα γυάλινο αντικείμενο με πλαστική σακούλα αυτό ηλεκτρίζεται.

2. Η φυσική θεωρεί ότι στο γυαλί εμφανίζεται ηλεκτρικό φορτίο το οποίο ευθύνεται για τις αλληλεπιδράσεις.

3. Υπάρχουν δύο τύποι ηλεκτρικού φορτίου· θετικό και αρνητικό. Το φορτίο το οποίο αναπτύσσεται στο γυαλί ορίζεται ως θετικό.



4. Κατά τη λειτουργία μιας ηλεκτροστατική μηχανής σε κάθε ακροδέκτη συγκεντρώνεται ηλεκτρικό φορτίο σε πολύ μεγαλύτερες ποσότητες από εκείνες που εμφανίζονται όταν τρίβουμε με συνηθισμένο τρόπο ένα αντικείμενο.

5. Ο μεγάλος «ε-

χθρός» των σχετικών πειραμάτων είναι η υγρασία. Αν η μέρα είναι υγρή πρέπει να έχουμε μαζί μας και ένα στεγνωτήρα μαλλιών.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Χρειαζόμαστε υλικά που υπάρχουν στο σχολικό εργαστήριο. Μια ηλεκτροστατική μηχανή Wimshurst, καλώδια με βύσμα και κροκοδειλάκια, πολλά καλώδια με κροκοδειλάκια, ηλεκτροστατικό εκκρεμές, μια γυάλινη ράβδο, μια πλαστική σακούλα, και έναν ηλεκτρικό θύσανο. Πρόκειται για ένα μεταλλικό στέλεχος στο κεφαλάκι του οποίου υπάρχουν κολλημένες λεπτές λωρίδες χαρτιού.

Τι κάνουμε. Τι παρατηρούμε

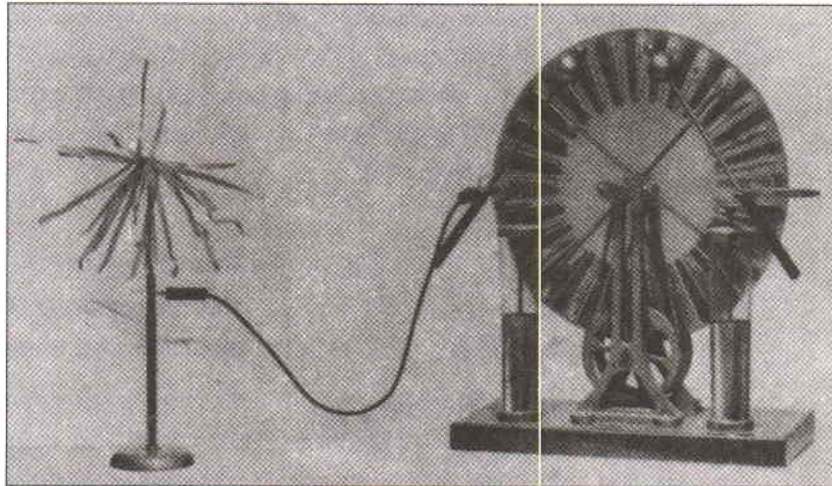
- Ένας μαθητής τρίβει το ένα άκρο της γυάλινης ράβδου με την πλαστική σακούλα και αμέσως μετά το πλησιάζει στο ηλεκτροστατικό εκκρεμές. Παρατηρούμε ότι το σφαιρίδιο «συγκινείται».
- Ο μαθητής αγγίζει με τη ράβδο το σφαιρίδιο του εκκρεμούς.
- Στο μεταξύ ένας άλλος μαθητής έχει βάλει σε λειτουργία την ηλεκτροστατική μηχανή. Ο προηγούμενος μαθητής πλησιάζει το σφαιρίδιο του εκκρεμούς στον έναν από τους ακροδέκτες οπότε το σφαιρίδιο απωθείται. Το πλησιάζει ύστερα στον άλλον και το σφαιρίδιο έλκεται.

Η ανάγνωση των γεγονότων στη γλώσσα της φυσικής

- Στην περιοχή που τρίψαμε τη ράβδο «εμφανίστηκε» ηλεκτρικό φορτίο. Εφόσον η ράβδος είναι από γυαλί το φορτίο αυτό λέγεται θετικό.
- Το ηλεκτρικό φορτίο μεταβιβάζεται. Στο σφαιρίδιο εμφανίζεται θετικό φορτίο.
- Καθώς λειτουργεί η ηλεκτροστατική μηχανή, στον ένα ακροδέκτη εμφανίζεται θετικό φορτίο. Είναι αυτός στον οποίο το σφαιρίδιο με το θετικό φορτίο απωθείται. Στον άλλο ακροδέκτη εμφανίζεται φορτίο αρνητικό.

• Παίρνουμε κάποιο καλώδιο και συνδέουμε το ένα άκρο του με ακροδέκτη της μηχανής και το άλλο άκρο, –αυτό με το βύσμα– με τον ηλεκτρικό θύσανο, με τη μηχανή σε λειτουργία.

• Τόσο στο στέλεχος του θυσάνου όσο και στις λωρίδες εμφανίζεται ηλεκτρικό φορτίο. Το ηλεκτρικό αυτό φορτίο μεταφέρεται από τον ακροδέκτη της μηχανής.



• Δύο μαθητές παίρνουν το θύσανο και τον βγάζουν έξω από την αίθουσα. Χρησιμοποιώντας καλώδια με κροκοδειλάκια –το ένα μετά το άλλο– συνδέουμε τον θύσανο με έναν ακροδέκτη της μηχανής την οποία κάποιος θέτει σε λειτουργία. Ο θύσανος «αναστατώνεται». Υπάρχουν δύο τουλάχιστον μάρτυρες.

• Το ηλεκτρικό φορτίο άγεται από τον ακροδέκτη στον ηλεκτρικό θύσανο μέσα από τα καλώδια ακόμα και αν ο θύσανος βρίσκεται έξω από την αίθουσα όπου λειτουργεί η μηχανή.

• Αντικαθιστούμε ένα από τα καλώδια και βάζουμε μια γομολάστιχα. Οι μάρτυρες διαπιστώνουν ότι ο θύσανος δείχνει «ασυγκίνητος».

• Η αγωγή αυτή δεν πραγματοποιείται αν παρεμβληθεί η γομολάστιχα. Η γομολάστιχα δεν είναι αγωγός.

Ερωτήσεις

α. Πλησιάζουμε το φορτισμένο σφαιρίδιο του εκκρεμούς σε ορισμένη απόσταση από τον ακροδέκτη. Παρατηρούμε ότι έλκεται και λέμε ότι στο σφαιρίδιο ασκείται δύναμη. Πόσες φορές μεγαλύτερη θα ήταν η δύναμη αν το πλησιάζαμε στο μισό της απόστασης;
Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

β. Τι το διαφορετικό θα συνέβαινε αν αντί για γυάλινη ράβδο είχαμε χρησιμοποιήσει ράβδο από εβονίτη την οποία θα τρίβαμε με μάλλινο ύφασμα;

γ. Τι προβλέπετε ότι θα συμβεί αν κάποιος μαθητής ακουμπήσει τον έναν ακροδέκτη της ηλεκτροστατικής μηχανής;

δ. Τι προβλέπετε ότι θα συμβεί αν πλησιάσουμε κοντά τους δύο ακροδέκτες καθώς λειτουργεί η μηχανή;

ε. Θα μπορούσε να αναστατωθεί ο θύσανος αν αντικαθιστούσαμε ένα από τα καλώδια

i) με ένα κομμάτι κιμωλίας
ii) με ένα κομμάτι αλουμινόχαρτο
iii) με ένα φύλλο τετραδίου

Τι προβλέπετε; Δοκιμάστε να το κάνετε.

στ. Τι προβλέπετε ότι θα συμβεί αν κάποιος πλησιάσει το χέρι του στον θύσανο σε στιγμή που είναι αναστατωμένος.

Εργαστηριακή άσκηση 2

Εικόνες με αόρατες δυναμικές γραμμές

Εάν φαντάζομαι βλέπω
Fernando Pessoa

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Ο βασικός λόγος για τον οποίο κάνουμε αυτή την άσκηση είναι για να γυμναστεί το βλέμμα της σκέψης μας στο να διακρίνει τις αόρατες δυναμικές γραμμές ενός πεδίου δυνάμεων.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Τους ορισμούς των εννοιών *μαγνητικό πεδίο* και *ηλεκτρικό πεδίο*.
2. Ότι ο μαγνήτης είναι πηγή μαγνητικού πεδίου.
3. Ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι πηγή ηλεκτρικού πεδίου.
4. Όταν η ένταση του πεδίου είναι η ίδια σε κάθε σημείο του το πεδίο λέγεται ομογενές. Οι δυναμικές γραμμές είναι σ' αυτή την περίπτωση παράλληλες.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Θα χρειαστούμε έναν ραβδομαγνήτη, σιδηρορινίσματα, ένα φύλλο χαρτί, ηλεκτροστατική μηχανή Wimshurst, καλώδια με βύσμα και με κροκοδειλάκι, ένα γυάλινο δίσκο, καστορέλαιο, δύο σύρματα, σουσάμι ή σπόρους γκαζόν, ηλεκτρικό θύσανο, δύο λεπτές μεταλλικές πλάκες με λεπτά νήματα προσκολλημένα σ' αυτές και δυο μονωτικούς στύλους πάνω σε βάση.

Τι κάνουμε. Τι παρατηρούμε

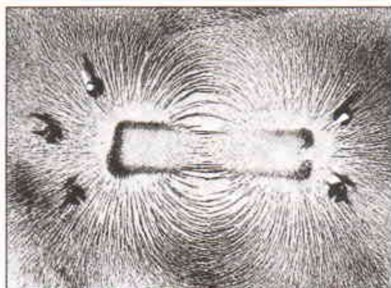
1. Βάζουμε τον μαγνήτη πάνω σ' ένα τραπέζι και τον σκεπάζουμε μ' ένα φύλλο χαρτί έτσι ώστε το χαρτί να διατηρείται οριζόντιο. Ρίχνουμε στη συνέχεια με τυχαίο τρόπο πάνω στο χαρτόνι σιδηρορινίσματα από μια ειδική «αλατιέρα». Αυτά πέφτουν και διατάσσονται σε έναν συγκεκριμένο σχηματισμό. Δημιουργούν μια εικόνα. Μαζεύουμε τα ρινίσματα και ξανακάνουμε το ίδιο. Η προηγούμενη εικόνα επανέρχεται. Αποσύρουμε τον μαγνήτη οπότε, αν αλατίσουμε, τα ρινίσματα θα ξαπλώνουν χωρίς να δημιουργούν κάποιο σχηματισμό.

2. Στη μικρή γυάλινη λεκάνη βάζουμε το καστορέλαιο και σπόρους χλόης οι οποίοι επιπλέουν στο υγρό. Τοποθετούμε και δυο παράλληλα μεταλλικά ελάσματα έτσι ώστε ίσα ίσα να καλύπτονται από το καστορέλαιο. Συνδέουμε τα δύο ελάσματα με τους ακροδέκτες της ηλεκτροστατικής μηχανής την οποία θέτουμε σε λειτουργία. Διαπιστώνουμε ότι οι σπόροι διατάσσονται σε γραμμές κάθετες στα δύο ελάσματα.

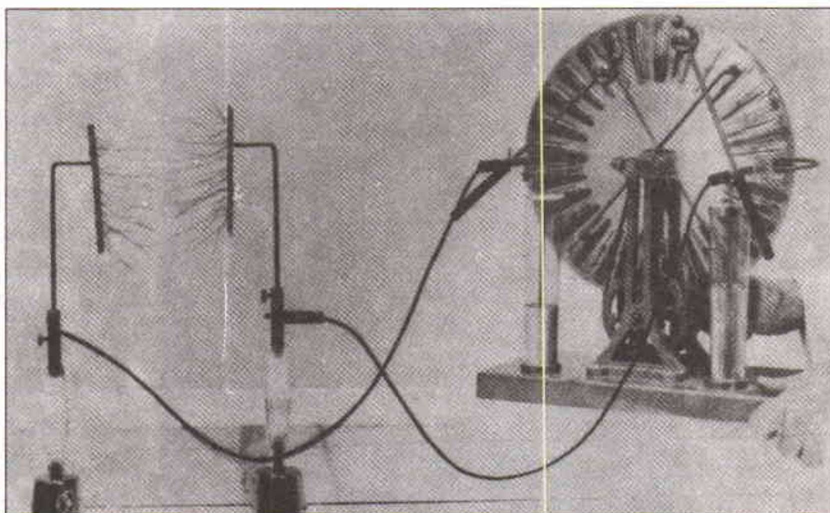


3. Παίρνουμε τις δύο μεταλλικές πλάκες με τα κολλημένα νήματα και τις στηρίζουμε πάνω σε μονωτικούς στύλους. Φροντίζουμε να είναι κατακόρυφες μεταξύ τους παράλληλες και να βρίσκονται σε απόσταση ίση με το άθροισμα των μηκών δύο νημάτων (γύρω στα 20 εκατοστά). Συνδέουμε στη συνέχεια τις πλάκες με τους ακροδέκτες της μηχανής. Τα νήματα διατάσσονται σχεδόν οριζόντια και παράλληλα μεταξύ τους.

Η ανάγνωση των γεγονότων στη γλώσσα της φυσικής



1. Τα ρινίσματα ξαπλώνουν πάντα σε αόρατες καμπύλες γραμμές οι οποίες λέγονται δυναμικές γραμμές.
Ο χώρος είναι μαγνητικό πεδίο. Οφείλει την ύπαρξη του στην παρουσία του μαγνήτη.
2. Η εικόνα με τους σπόρους καθοδηγεί το βλέμμα της σκέψης μας στο να διακρίνει αόρατες γραμμές παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στα δυο ελάσματα. Είναι οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου. Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές.
3. Στη μια από τις πλάκες εμφανίζεται θετικό ηλεκτρικό φορτίο το οποίο άγεται, μέσα από το καλώδιο, από τον έ-



να ακροδέκτη της μηχανής. Στην άλλη άγεται ίσο σε ποσότητα αρνητικό φορτίο με τον ίδιο τρόπο. Το φορτίο των πλακών αποτελεί πηγή ηλεκτρικού πεδίου. Τα οριζόντια νήματα μάς οδηγούν στο να φανταστούμε τις αόρατες δυναμικές γραμμές του πεδίου. Είναι μεταξύ τους παράλληλες, πράγμα που σημαίνει ότι το δημιουργούμενο πεδίο είναι ομογενές.

Στην εργαστηριακή άσκηση 1, είχαμε συνδέσει έναν ακροδέκτη της μηχανής με τον ηλεκτρικό θύσανο και παρατηρήσαμε τα νήματα να διατάσσονται σαν ακτίνες που θα μπορούσαν να ξεκινούν από το κεφαλάκι του στελέχους. Η εικόνα αυτή μάς οδηγεί επίσης στο να διακρίνουμε, με το βλέμμα, εννοείται, της σκέψης, τις αόρατες δυναμικές γραμμές ενός πεδίου που δεν είναι ομογενές.

Ερωτήσεις

α. Τι προβλέπετε ότι θα συμβεί με τα σιδηρορινίσματα εάν κάτω από το χαρτί αντί για έναν μαγνήτη βάλουμε δύο ραβδομαγνήτες στην ίδια ευθεία έτσι ώστε ο βόρειος πόλος του ενός να «βλέπει» τον νότιο πόλο του άλλου; Δοκιμάστε να το κάνετε.

β. Πως θα πρέπει να είναι μια διάταξη με σπόρους γκαζόν και καστορέλαιο ώστε οι σπόροι να διατάσσονται ακτινωτά; Δοκιμάστε να το πραγματοποιήσετε.

Εργαστηριακή άσκηση 3

Θέρμανση χωρίς θερμότητα (φαινόμενο Joule)

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Ο James Prescot Joule (Τζέημς Πρέσκοτ Τζάουλ) υπήρξε ένας από τους ικανότερους πειραματιστές της γενιάς του. Στα 1840, μόλις 22 ετών, παρουσίασε μια εργασία πάνω στη θέρμανση των ρευματοφόρων αγωγών. Ακολουθώντας, όπως έκανε πάντα, τον δρόμο της πειραματικής δρατηριότητας κατέληξε σε συμπεράσματα τα οποία συνήθως αναφέρονται ως νόμος του Joule.

Η άσκηση γίνεται με σκοπό

α) να εμβαθύνουμε σε ορισμένες από τις πτυχές της πειραματικής έρευνας και

β) να ασκηθούμε στο να περιγράφουμε τα γεγονότα στη γλώσσα των εννοιών.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Ότι η θερμότητα είναι ενέργεια μεταβιβαζόμενη από ένα σώμα σ' ένα άλλο μόνον εφόσον υπάρχει διαφορά θερμοκρασιών.
2. Ότι ένα σώμα μπορεί να θερμαίνεται και χωρίς θερμότητα αρκεί να μεταβιβάζεται σ' αυτό ενέργεια υπό μορφή έργου.
3. Τον νόμο του Joule.
4. Να συναρμολογούμε ένα κύκλωμα βασιζόμενοι στη σχηματική παράσταση που το περιγράφει.
5. Να χρησιμοποιούμε αμπερόμετρο, βολτόμετρο, θερμόμετρο και χρονόμετρο.
6. Ότι αν η γραφική παράταση δύο μεγεθών είναι ευθεία που

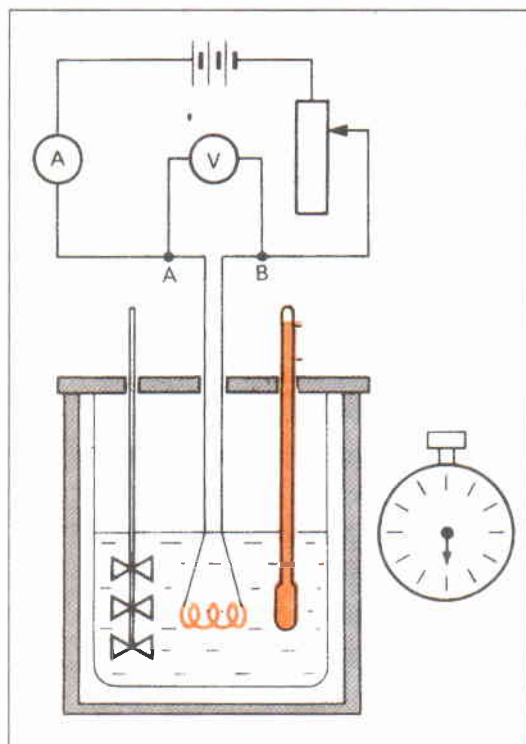
περνάει από την αρχή των αξόνων τα δύο μεγέθη είναι ανάλογα.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

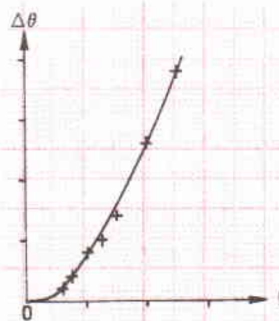
Χρειαζόμαστε τροφοδοτικό (ή ηλεκτρικές στήλες) διακόπτη, καλώδια, ροοστάτη, αμπερόμετρο 0-5A, βολτόμετρο, θερμιδόμετρο, χρονόμετρο, θερμόμετρο ψηφιακό. Χρειαζόμαστε επίσης σύρμα χρωμονικελίνης με πάχος 0,2 mm και μήκος ενός μέτρου το οποίο θα τυλίξουμε σε σπείρες.

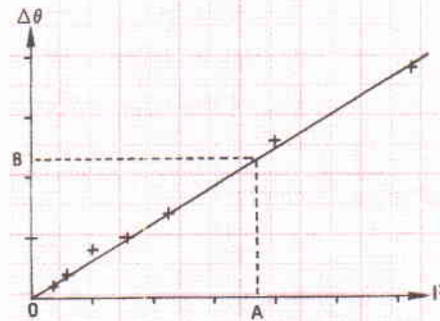
Τι κάνουμε

Συναρμολογούμε το κύκλωμα που περιγράφεται με το παρακάτω σχήμα. Βυθίζουμε το σπείρωμα της χρωμονικελίνης στο νερό. Κλείνουμε το διακόπτη, σημειώνουμε εκείνη τη στιγμή την –αρχική– θερμοκρασία (θ_1) και αφήνουμε να περάσει ηλεκτρικό ρεύμα επί ορισμένα λεπτά, οπότε καταγράφουμε τη νέα θερμοκρασία (θ_2). Μετακινούμε στη συνέχεια τον ροοστάτη και ξανακάνουμε το πείραμα επί την ίδια χρονική διάρκεια αλλά με ρεύμα διαφορετικό. Μπορούμε κατ' αυτόν τον τρόπο να επαναλάβουμε το πείραμα αρκετές φορές. Καταγράφουμε τα αποτελέσματα σε πίνακα. Από κει και πέρα προχωράμε κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν του πειράματος που περιγράφεται παρακάτω. Σ' ένα πραγματικό πείραμα που έγινε με θερμιδόμετρο νερού στο οποίο κάθε μια από τις χρονικές διάρκειες ήταν 3 λεπτά, πήραμε τα αποτελέσματα που αναγράφονται στον πίνακα. Όταν χαράξαμε τη γραφική παράσταση $\Delta\theta = f(I)$ φάνηκε καθαρά ότι τα ποσά δεν είναι ανάλογα. Στη γραφική, όμως, παράσταση, $\Delta\theta = f(I^2)$ το γράφημα ήταν ευθεία γραμμή.



I	Θ1	Θ2	ΔΘ	I^2
A	°C	°C	K	A^2
0,60	19,39	19,60	0,22	0,36
0,75	19,60	20,00	0,40	0,56
1,00	20,10	20,90	0,80	1,00
1,25	21,10	22,10	1,00	1,56
1,50	22,60	24,00	1,40	2,25
2,00	24,20	26,80	2,60	4,00
2,50	26,80	30,60	3,80	6,25





Στη γλώσσα των εννοιών

Η ευθεία γραμμή της γραφικής παράσταση $Δθ = f(I^2)$ σημαίνει ότι η θερμοκρασιακή αύξηση του νερού (σε ορισμένο χρόνο) εμφανίζεται ανάλογη προς το τετράγωνο του ρεύματος. Αυτό σημαίνει ότι η μεταβιβαζόμενη στο νερό θερμότητα (σε ορισμένο χρόνο) είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του ρεύματος.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος η θερμοκρασία και η εσωτερική θερμική ενέργεια του αντιστάτη παρέμεινε σταθερή. Συνεπώς, σύμφωνα με τη θερμοδυναμική, η ανά μονάδα χρόνου ενέργεια που μεταβιβάζεται στον αντιστάτη (υπό μορφή έργου ηλεκτρικών δυνάμεων) είναι ίση με την ανά μονάδα χρόνου θερμότητα που μεταβιβάζει ο αντιστάτης στο νερό. Μπορούμε δηλαδή να καταλήξουμε το συμπέρασμα ότι *η ανά μονάδα χρόνου μεταβιβαζόμενη στον αντιστάτη ενέργεια είναι ανάλογη με το τετράγωνο της έντασης του ρεύματος, που διαρρέει τον αντιστάτη.*

Η αναλογία αυτή επιβεβαιώνει και τη γνωστή εξίσωση $P = I^2 R$
Τελικά

- Το σύρμα θερμαίνεται χωρίς θερμότητα. Η θέρμανσή του γίνεται με μεταβίβαση ενέργειας υπό μορφή έργου ηλεκτρικών δυνάμεων.
- Το νερό θερμαίνεται με μεταβίβαση θερμότητας.

Ερωτήσεις

Σας ζητούμε να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα

i) πόση ήταν η μεταβιβαζόμενη στο σύρμα ισχύς όταν το ρεύμα είχε τις διάφορες τιμές που παρουσιάζονται στον πίνακα;

ii) πόση θερμότητα μεταβιβάστηκε από το σύρμα στο νερό μέσα σε τρία λεπτά όταν η ένταση ήταν 1Α και πόση όταν ήταν 2Α;

iii) ποια από τις παρακάτω τιμές για τη μάζα του νερού θεωρείτε ότι βρίσκεται πλησιέστερα στη μάζα του νερού που χρησιμοποιήθηκε; 50 g, 100g, 200g, 250g

Εργαστηριακή άσκηση 4

Ανακρίνοντας μια ηλεκτρική στήλη (Μέτρηση ηλεκτρεγερτικής δύναμης και εσωτερικής αντίστασης μιας πηγής)

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Ο βασικός λόγος για τον οποίο κάνουμε αυτή την άσκηση είναι για να δείξουμε πως είναι δυνατόν να συνδυάζουμε τις ενδείξεις των οργάνων με τους φυσικούς νόμους ώστε να καταλήγουμε σε μετρήσεις μεγεθών όπως είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η εσωτερική αντίσταση μιας πηγής. Πρόκειται για «ανάκριση» της ηλεκτρικής στήλης με σκοπό την αποκάλυψη των «στοιχείων ταυτότητάς της».

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Να συναρμολογούμε ένα κύκλωμα βασιζόμενοι στη σχηματική παράσταση που το περιγράφει.
2. Να διαβάζουμε τις ενδείξεις ενός βολτομέτρου και ενός αμπερομέτρου.
3. Τι ακριβώς μετράμε με ένα αμπερόμετρο και τι με ένα βολτόμετρο.
4. Τον νόμο του Ohm για αντιστάτη.
5. Τον νόμο του Ohm για κύκλωμα με αντιστάτη και πηγή.
6. Ότι αν συνδέσουμε τους ακροδέκτες ενός βολτομέτρου με τους πόλους πηγής, η ένδειξη του οργάνου μπορεί να θεωρηθεί ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής εφόσον η εσωτερική αντίσταση είναι πολύ μικρή σε σχέση με την αντί-

σταση του βολτομέτρου.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Και για τα δύο πειράματα θα χρειαστούμε μια ηλεκτρική στήλη με άγνωστα στοιχεία, διακόπτη και καλώδια.

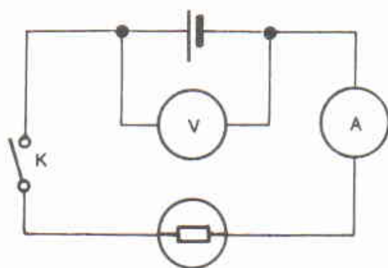
Ειδικά για το πρώτο πείραμα πρέπει να έχουμε έναν λαμπτήρα, ένα βολτόμετρο 0-10V με αντίσταση πολύ μεγάλη σε σχέση με εκείνη της πηγής και ένα αμπερόμετρο 0-3A με εσωτερική αντίσταση πολύ μικρή σε σχέση με εκείνη του λαμπτήρα.

Για το δεύτερο πείραμα θα χρειαστούμε επίσης δύο αντιστάτες μερικών δεκάδων Ωμ (ο καθένας) και ένα αμπερόμετρο με εσωτερική αντίσταση μικρή συγκριτικά με εκείνη που έχουν οι αντιστάτες.

Τι κάνουμε

α. Συναρμολογούμε το κύκλωμα που παριστάνεται στο σχήμα

Όταν ο διακόπτης είναι ανοικτός σημειώνουμε την ένδειξη του βολτομέτρου.



Κλείνουμε τον διακόπτη και καταγράφουμε τις ενδείξεις του αμπερομέτρου και του βολτομέτρου.

Βασιζόμενοι στις τρεις αυτές ενδείξεις και εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm για κλειστό κύκλωμα με πηγή και αντιστάτη και τον νόμο του Ohm για αντιστάτη, υπολογίζουμε τελικά

i) την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής

ii) την εσωτερική αντίσταση της πηγής και

iii) την αντίσταση του λαμπτήρα

Συζητάμε για τα σφάλματα.

β. Συναρμολογούμε ένα κύκλωμα με την ίδια πηγή και με αντιστάτη γνωστής αντίστασης R_1 παρεμβάλλοντας και αμπερόμετρο. Κλείνουμε το κύκλωμα και καταγράφουμε την ένδειξη του οργάνου. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία αλλάζοντας τον αντιστάτη με άλλον γνωστής επίσης αντίστασης R_2. Καταγράφουμε τη νέα ένδειξη του αμπερομέτρου. Βασιζόμενοι στις δύο αυτές ενδείξεις και εφαρμόζοντας τον νόμο του Ohm για κλειστό κύκλωμα με αντιστάτη και πηγή υπολο-

γίζουμε τα στοιχεία ταυτότητας της πηγής. Συγκρίνουμε το αποτέλεσμα με εκείνο του προηγούμενου πειράματος.

Ερωτήσεις

α. Πόση ενέργεια μεταβιβάζεται στον αντιστάτη R_1 και πόση στον R_2 του δεύτερου πειράματος σε ένα δευτερόλεπτο;
β. Σας ζητούμε να προβλέψετε τι θα δείξει το αμπερόμετρο σε ένα κύκλωμα με την ίδια πηγή αν ο αντιστάτης είναι 100 Ω. Αφού κάνετε την πρόβλεψη να δοκιμάσετε να το κάνετε και να σχολιάσετε τη διαφορά ανάμεσα σ' αυτό που προβλέψατε και σ' αυτό που σας δείχνει το όργανο.

Εργαστηριακή άσκηση 5

Ο μαγνήτης επιδρά σε ρευματοφόρο αγωγό

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Η άσκηση αυτή γίνεται για να ερευνήσουμε τη δύναμη Laplace και για να περιγράψουμε αυτά που θα παρατηρήσουμε σε μια γλώσσα που απαιτεί έννοιες της γεωμετρίας και έννοιες της φυσικής.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Ότι η αλληλεπίδραση ρευματοφόρων αγωγών και μαγνητών έχει δύο «όψεις» και σύμφωνα με τη μια απ' αυτές ο μαγνήτης επιδρά σε ρευματοφόρο αγωγό.
2. Ότι κάθε μαγνήτης αποτελεί πηγή μαγνητικού πεδίου και ότι οι δυναμικές γραμμές αυτού του πεδίου κατευθύνονται από τον βόρειο πόλο προς τον νότιο.
3. Ότι η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος καθορίζεται από την πολικότητα της τάσης.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Χρειαζόμαστε μια βάση από μαντέμι, μια ράβδο μήκους 80 εκατοστών και πάχους 10 χιλιοστών, έναν απλό σύνδεσμο, μια ράβδο εβονίτη με δύο ακροδέκτες, μια χάλκινη ράβδο (ή ένα χοντρό σύρμα) πάχους 5 χιλιοστών και μήκους 10 περίπου εκατοστών, ένα αιωρούμενο πηνίο, πεταλοειδή μαγνήτη, καλώδια με κατάλληλο μήκος αλλά όχι κροκοδειλάκια, τροφοδοτικό ή δύο ηλεκτρικές στήλες των 4,5 V και διακόπτη μπουτόν.

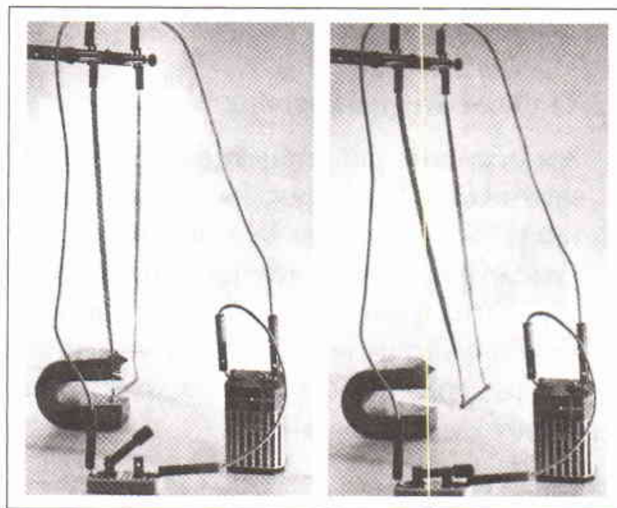
Τι κάνουμε. Τι παρατηρούμε

α. Συναρμολογούμε τη διάταξη. Βιδώνουμε τη μακριά ράβδο πάνω στη μαντεμένια βάση και στερεώνουμε, με τη βοήθεια του συνδέσμου, τη ράβδο από εβονίτη. Κρεμάμε με καλώδια τη χάλκινη ράβδο χρησιμοποιώντας για τις συνδέσεις λεπτά χάλκινα συρματάκια. Συνδέουμε τους ακροδέκτες με τους πόλους της ηλεκτρικής στήλης (ή με τους ακροδέκτες του τροφοδοτικού) παρεμβάλλοντας διακόπτη. Τοποθετούμε τον μαγνήτη έτσι ώστε η χάλκινη ράβδος να βρίσκεται ανάμεσα στους πόλους του.

Η περιγραφή των γεγονότων στη γλώσσα της γεωμετρίας και της φυσικής

α. Ο μαγνήτης που διαθέτουμε είναι πηγή μαγνητικού πεδίου. Εφόσον έχει το συγκεκριμένο σχήμα, το πεδίο μεταξύ των πόλων του μπορεί να θεωρηθεί ομογενές.

Με το βλέμμα, εννοείται, της σκέψης μπορούμε να διακρίνουμε τις αόρατες δυναμικές γραμμές αυτού του πεδίου. Είναι γραμμές κατακόρυφες και αν υποτεθεί ότι ο βόρειος πόλος είναι από πάνω οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται προς τα κάτω. Σύμφωνα με τη θεωρητική σκέψη η χάλκινη ράβδος είναι ένας ευθύγραμμος αγωγός κάθετος στις δυναμικές γραμμές του ομογενούς μαγνητικού πεδίου.



β. Κλείνουμε τον διακόπτη και παρατηρούμε ότι η χάλκινη ράβδος εκτινάσσεται. Ας υποθέσουμε ότι εκτινάσσεται προς τα έξω.

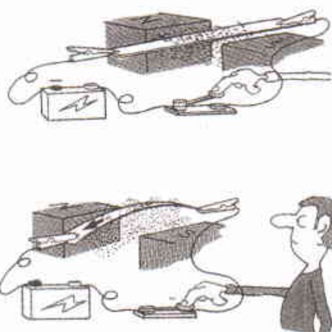
β. Μόλις κλείσαμε τον διακόπτη η ράβδος εκτινάχθηκε.

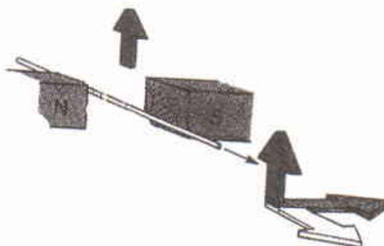
Μόλις ρευματοδοτήθηκε της ασκήθηκε κάποια δύναμη.

Είμαστε λοιπόν υποχρεωμένοι να δεχθούμε ότι η διεύθυνση της δυναμης είναι κάθετη τόσο στη ράβδο όσο και στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου και η φορά της είναι προς τα έξω. Ποιος όμως άσκησε τη δύναμη αυτή;

γ. Απομακρύνουμε τον μαγνήτη και ρευματοδοτούμε το κύκλωμα. Παρατηρούμε ότι η ράβδος παραμένει αμετακίνητη.

γ. Η θεωρητική υποψία ότι η δύναμη στον ρευματοφόρο αγωγό ασκήθηκε από το μαγνητικό πεδίο γίνεται βεβαιότητα. Η δύναμη αυτή λέγεται και δύναμη Laplace.





δ. Ανοίγουμε τον διακόπτη και ξαναφέρνουμε τον μαγνήτη στην αρχική του θέση αλλά με τον νότιο πόλο προς τα πάνω.
Κλείνουμε τον διακόπτη και η χάλκινη ράβδος εκτινάσσεται προς το εσωτερικό του μαγνήτη.

δ. Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου κατευθύνονται προς τα κάτω. Η φορά της δυναμης Laplace εξαρτάται από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

ε. Ανοίγουμε τον διακόπτη και αναστρέφουμε την πολικότητα της τροφοδοσίας. Όταν κλείσουμε τον διακόπτη η ράβδος θα εκτιναχθεί προς το εξωτερικό του μαγνήτη.

ε. Το ρεύμα έχει τώρα αντίθετη φορά. Η φορά της δύναμης Laplace εξαρτάται και από την κατεύθυνση του ρεύματος.

στ. Ανοίγουμε τον διακόπτη και αυξάνουμε την τάση της τροφοδοσίας διατηρώντας την προηγούμενη πολικότητα.

στ. Το ρεύμα έχει τώρα μεγαλύτερη ένταση. Η τιμή της δύναμης Laplace καθορίζεται από την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Σας ζητούμε επίσης

1. Βασιζόμενοι στη θεωρία για τη δύναμη Laplace να τοποθετήσετε τον μαγνήτη με τον βόρειο πόλο προς τα πάνω, να τροφοδοτήσετε το κύκλωμα με τάση ορισμένης πολικότητας και πριν να κλείσετε το διακόπτη να προβλέψετε αυτό που θα συμβεί, δικαιολογώντας την πρόβλεψη.
Να κλείσετε, στη συνέχεια, τον διακόπτη και να διαπιστώσετε αν η πρόβλεψη σας ήταν σωστή.
2. Να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα
   i) Γιατί δεν πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κροκοδειλάκια;
   ii) Τι θα συνέβαινε αν αντί για χάλκινη ράβδο χρησιμοποιούσαμε σιδερένια;
   iii) Γιατί η εκδήλωση της δύναμης Laplace στο αιωρούμενο πηνίο είναι ισχυρότερη σε σύγκριση με εκείνη στον χάλκινο αγωγό;
   iv) Τι θα συνέβαινε αν βάζαμε ένα πολύ μικρό χάλκινο σύρμα έτσι ώστε να αιωρείται κατακόρυφα ανάμεσα στους πόλους του μαγνήτη και το ρευματοδοτούσαμε;

Εργαστηριακή άσκηση 6

Ο ρευματοφόρος αγωγός επιδρά σε μαγνητική βελόνα



Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση αναφέρεται σ' ένα κρίσιμο (για την εξέλιξη των επιστημονικών ιδεών) πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τον Χανς Κρίστιαν Έρστεντ στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης στις 20 Ιουλίου του 1820.

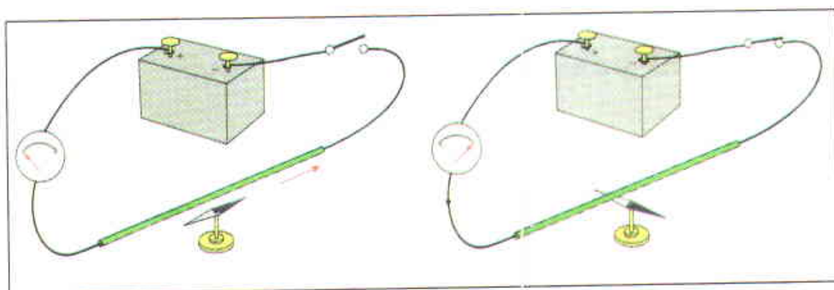
Το κάνουμε με σκοπό να εμβαθύνουμε στις λεπτομέρειες ενός ανάλογου πειράματος και να τις συνδυάσουμε με τη θεωρητική περιγραφή του μαγνητικού πεδίου.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Ότι το πείραμα Έρστεντ έδειχνε πως ένα ρευματοφόρο καλώδιο επιδρά σε μια μαγνητική βελόνα και ότι με το πείραμα αυτό άνοιξε ο δρόμος, για την ενοποίηση του ηλεκτρισμού με τον μαγνητισμό.
2. Ότι αν μια μαγνητική βελόνα αλλάξει ξαφνικά προσανατολισμό σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο στο οποίο μέχρι τότε ισορροπούσε έχει μεταβληθεί.
3. Τα βασικά στοιχεία της θεωρητικής περιγραφής του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Θα χρειαστεί να αναζητήσουμε μια μαγνητική βελόνα στρεπτή περί κατακόρυφο άξονα, καλώδια, τρεις στήλες των 4,5V και έναν διακόπτη. Θα μπορούσαμε επίσης να χρησιμοποιήσουμε δύο μονωτικούς στύλους.



Τι κάνουμε. Τι παρατηρούμε

α. Συναρμολογούμε το ηλεκτρικό κύκλωμα με μια στήλη 4,5 V, διακόπτη και ένα μακρύ καλώδιο το οποίο θα διατηρούμε τεντωμένο πάνω από τη μαγνητική βελόνα παράλληλα προ τον άξονά της. Κλείνουμε το διακόπτη και παρατηρούμε αυτό που για πρώτη φορά παρατήρησε ο Έρστεντ. Βλέπουμε, δηλαδή, τη βελόνα να εκτρέπεται από την αρχική της θέση και αφού ταλαντωθεί για λίγο να ισορροπεί σε μια νέα θέση.

β. Αλλάζουμε την πολικότητα της τροφοδοσίας. Παρατηρούμε ότι τώρα η βελόνα εκτρέπεται προς την άλλη.

Η περιγραφή των γεγονότων στη γλώσσα της γεωμετρίας και της φυσικής

α. Ο ρευματοφόρος αγωγός αποτελεί πηγή μαγνητικού πεδίου. Πριν κλείσουμε το διακόπτη η βελόνα ισορροπούσε στο γεωμαγνητικό πεδίο προσανατολισμένη κατά την οριζόντια συνιστώσα του.

Το μαγνητικό πεδίο στο οποίο τώρα ισορροπεί προέρχεται από τη σύνθεση του (προϋπάρχοντος) γεωμαγνητικού πεδίου και του μαγνητικού πεδίου που δημιούργησε ο ρευματοφόρος αγωγός.

β. Αν αναστραφεί η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος ανα-

στρέφεται και η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Τι παρατηρούμε επίσης

Αυξάνουμε την τάση τροφοδοσίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούμε τρεις στήλες των 4,5 V συνδεδεμένες σε σειρά. Τεντώνουμε το καλώδιο πάνω από τη βελόνα στην ίδια απόσταση με την προηγούμενη και διαπιστώνουμε μεγαλύτερη γωνία εκτροπής.

Διατηρούμε το ρευματοφόρο καλώδιο πάνω από τη βελόνα στην αρχική θέση και σημειώνουμε τη γωνία εκτροπής. Στη συνέχεια το απομακρύνουμε αργά διατηρώντας το παράλληλο προς τον άξονα της βελόνας και παρατηρούμε ότι η εκτροπή διαρκώς μειώνεται.

Φέρνουμε το τεντωμένο ρευματοφόρο καλώδιο πάνω από τη βελόνα πολύ κοντά της και κάθετα στον άξονα της καθώς ισορροπεί. Παρατηρούμε ότι η βελόνα μένει «ασυγκίνητη».

Σας ζητούμε

1. Σας ζητούμε τώρα να βασιστείτε στη θεωρητική περιγραφή του μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου αγωγού και να *προβλέψετε* τι θα συμβεί αν τοποθετήσουμε το ρευματοφόρο καλώδιο παράλληλα προς τον άξονα της βελόνας αλλά ακριβώς κάτω από αυτήν.

Στη συνέχεια δοκιμάστε να το κάνετε. Αυτό που παρατηρείτε συμπίπτει με την πρόβλεψή σας;

2. Σας ζητούμε επίσης, βασιζόμενοι στην ίδια θεωρία, να ερμηνεύσετε το γεγονός ότι η βελόνα μένει «ασυγκίνητη» αν φέρουμε το ρευματοφόρο καλώδιο ακριβώς από πάνω της, κάθετα στον άξονά της.

3. Σας ζητούμε, τέλος, να προσδιορίσετε πειραματικά την οριζόντια συνιστώσα του γεωμαγνητικού πεδίου της περιοχής σας. Θα χρειαστείτε αμπερόμετρο και υποδεκάμετρο. Για το σκοπό αυτό να παρεμβάλλετε το αμπερόμετρο στο κύκλωμα.

Θα χρειαστεί να τοποθετήσετε τον ρευματοφόρο αγωγό παράλληλα προς τη βελόνα, πάνω απ' αυτήν και σε απόσταση την οποία θα μπορείτε να μετρήσετε. Ταυτόχρονα ση-

μειώστε με όση ακρίβεια μπορείτε τη γωνία εκτροπής.

Η γωνία εκτροπής, η ένταση του ρεύματος και η απόσταση της βελόνας από τον αγωγό είναι τα στοιχεία που θα σας οδηγήσουν στο ζητούμενο αρκεί να τα συνδυάσετε με τη θεωρία για το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού και με απλές γνώσεις τριγωνομετρίας.

Όταν ολοκληρώσετε τις μετρήσεις και τους υπολογισμούς και καταλήξετε σε κάποιο αποτέλεσμα για την τιμή της B_{op} να το συγκρίνετε με την τιμή $2{,}6\ 10^{-5}$ Tesla, με την τιμή δηλαδή που δίνουν οι ειδικοί για την B_{op} της περιοχής.

Εργαστηριακή άσκηση 7

Αντιστέκεται στην αιτία που το δημιουργεί

Γιατί κάνουμε αυτή την άσκηση

Η εργαστηριακή αυτή άσκηση γίνεται για να κατανοήσουμε βαθύτερα ένα σχεδόν «μαγικό» φαινόμενο η ανακάλυψη του οποίου άλλαξε ριζικά την πορεία του πολιτισμού μας. Στην πιο απλή εκδήλωσή του το φαινόμενο αυτό συνίσταται στο ότι «αν σε ένα μεταλλικό δακτύλιο πλησιάσουμε έναν μαγνήτη, στον δακτύλιο δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα». Είναι εντυπωσιακά απλό. Δύσκολο είναι το να ανιχνεύσουμε το ηλεκτρικό αυτό ρεύμα.

Η άσκηση επίσης γίνεται με σκοπό να αναγνωρίσουμε τη μεγάλη απόσταση που συχνά υπάρχει ανάμεσα στα γεγονότα άμεσης παρατήρησης και στην ερμηνεία τους.

Τι χρειάζεται να ξέρουμε

1. Το πώς εκδηλώνεται το φαινόμενο *ηλεκτρομαγνητική επαγωγή*.
2. Τον κανόνα του Lenz για τη φορά του επαγωγικού ρεύματος.
3. Ότι ένας ρευματοφόρος δακτύλιος αποτελεί μαγνητικό δίπολο καθώς και ότι το *ποια πλευρά του θα συμπεριφέρεται ως βόρειος πόλος και ποια ως νότιος* καθορίζεται από τη φορά του ρεύματος που το διαρρέει.
4. Οι ομώνυμοι πόλοι απωθούνται ενώ οι ετερώνυμοι έλκονται.

Τι υλικά θα χρειαστούμε

Τα βασικά αντικείμενα που πρέπει να διαθέτουμε είναι ένας μαγνήτης και ένας μεταλλικός (αλλά όχι σιδερένιος) δακτύλιος. Θα μπορούσε, λόγου χάριν, να είναι χάλκινος. Προκειμέ-

νου όμως να εκδηλωθεί η πιθανή επίδραση του μαγνήτη σ' αυτόν, πρέπει ο δακτύλιος να είναι κρεμασμένος. Για τον λόγο αυτόν θα χρειαστούμε ακόμα μια βάση από μαντέμι, μια ράβδο 80 περίπου εκατοστών (πάχους 10 χιλιοστών), μια ακόμα ράβδο ίδιου πάχους αλλά μικρότερη, έναν απλό σύνδεσμο, δύο ορειχάλκινους δακτυλίους και φυσικά νήμα.

Το πείραμα μπορούμε να το πραγματοποιήσουμε και εάν αντί για χάλκινο δακτύλιο κρεμάσουμε ένα πηνίο με κλειστό κύκλωμα.

Τι κάνουμε. Σε ποια συμπεράσματα καταλήγουμε

Βιδώνουμε πάνω στη μαντεμένια βάση την πιο μεγάλη από τις ράβδους και πάνω σ' αυτήν, χρησιμοποιώντας τον σύνδεσμο, στηρίζουμε τη μικρότερη έτσι ώστε να είναι οριζόντια.

Κρεμάμε στη συνέχεια τον μεταλλικό δακτύλιο χρησιμοποιώντας το νήμα. Κρατάμε με το ένα χέρι τον ραβδομαγνήτη κατά τρόπο ώστε ο βόρειος πόλος να «βλέπει» προς το δακτύλιο και τον πλησιάζουμε προς το δακτύλιο χωρίς καθόλου να βιαζόμαστε οπότε και δεν παρατηρείται τίποτα απολύτως.

Επαναλαμβάνουμε το εγχείρημα με μία πιο απότομη κίνηση ώστε η προσέγγιση προς τον δακτύλιο να γίνει πολύ πιο γρήγορα. Παρατηρούμε ότι ο δακτύλιος απωθείται. Συμπεριφέρεται σαν να αρνείται την προσέγγιση.

Δοκιμάζουμε στη συνέχεια προσεγγίζοντας τον νότιο πόλο και διαπιστώνουμε ότι συμβαίνει το ίδιο.

Περνάμε ύστερα τον μαγνήτη μέσα στον μεταλλικό δακτύλιο χωρίς να τον αγγίζει και τον τραβάμε απότομα προς τα έξω.

Διαπιστώνουμε ότι σ' αυτή την περίπτωση ο δακτύλιος έλκεται από το μαγνήτη. Μπορούμε όμως να πούμε ότι και πάλι συμπεριφέρεται σαν να «αρνείται» την απομάκρυνση του μαγνήτη και να θέλει να τη ματαιώσει.

Η περιγραφή των γεγονότων και η ερμηνεία τους

Πως είναι δυνατόν ένας χάλκινος δακτύλιος να ασκεί άλλοτε απωστική και άλλοτε ελκτική δύναμη σ' έναν μαγνήτη; Τι είδους δύναμη είναι αυτή;

Μια λογική υπόθεση: η δύναμη είναι μαγνητική. Ο χάλκινος δίσκος συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης. Για να ισχύει όμως αυτό μόνο ένα πράγμα μπορεί να συμβαίνει. Η προσέγγιση του μαγνήτη να κάνει τον δακτύλιο ρευματοφόρο και βέβαια ένας ρευματοφόρος δακτύλιος αποτελεί μαγνητικό δίπολο.



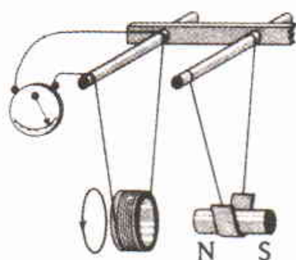
Σύμφωνα με τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής αυτό μπορεί να συμβαίνει. Καθώς λοιπόν τον πλησιάζει ο βόρειος πόλος ο χάλκινος δακτύλιος γίνεται πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης και επειδή συνιστά και κλειστό κύκλωμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα.

Η φορά του επαγωγικού αυτού ρεύματος είναι, σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz, τέτοια ώστε το ρεύμα μέσα από τις μαγνητικές εκδηλώσεις του να αντιστέκεται στην αιτία που το δημιουργεί.

Και θα μπορούσαμε να δεχθούμε ότι αρχική αιτία της δημιουργίας του είναι η προσέγγιση του βόρειου πόλου. Το ρεύμα λοιπόν έχει τέτοια φορά ώστε η πλευρά του δακτυλίου προς το μέρος του μαγνήτη να συμπεριφέρεται ως βόρειος πόλος και να απωθεί τον βόρειο πόλο του μαγνήτη.

Και κάποια ερωτήματα

Το πρώτο. Πώς ερμηνεύεται το γεγονός ότι καθώς απομακρύνεται ο μαγνήτης ο δακτύλιος έλκεται από αυτόν;



Το δεύτερο. Καθώς πλησιάζει ο βόρειος πόλος ο μαγνήτης εκδηλώνει άπωση. Αν συνέβαινε το αντίθετο (και ο μαγνήτης εκδήλωνε έλξη) το φαινόμενο θα παραβίαζε την αρχή της διατήρησης της ενέργειας. Γιατί;

Το τρίτο. Αν απομακρύνουμε τον κρεμασμένο μαγνήτη από τη θέση ισορροπίας (σχήμα) και τον αφήσουμε ελεύθερο να αιωρηθεί, τι θα συμβεί;

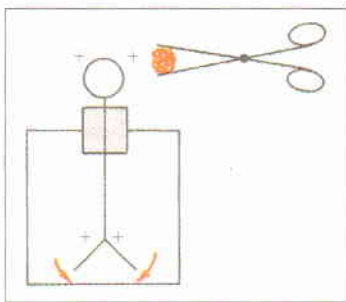
Δικαιολογήστε την απάντηση.

Β′ μέρος

Δραστηριότητες



1. Φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο 2. Πυκνωτής από αλουμινόχαρτο. 3. Ο μετρητής της ΔΕΗ 4. Ασφάλεια από ατσαλόμαλλο. 5. Δύο διαφορετικές συνδέσεις. 6. Αναζητώντας τον μαγνητικό μεσημβρινό. 7. Επαγωγή με σχετική κίνηση. 8. Αυτεπαγωγή 9. Η λίμα, το καρφί και οι σπινθήρες. 10. Ο μετασχηματιστής και τα βολτόμετρα. 11. Ο μετασχηματιστής και ο παλμογράφος.



1. Φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο

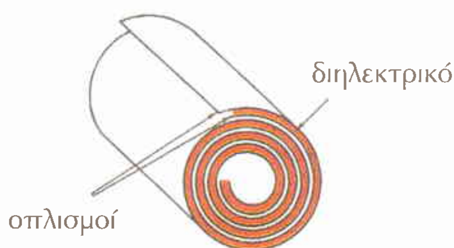
Αναζητήστε το ηλεκτροσκόπιο και επιδιώξτε να το φορτίσετε θετικά.

Στο θετικά φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο πλησιάστε ένα πυρακτωμένο συρματάκι σαν αυτό που χρησιμοποιούμε για το τρίψιμο της κατσαρόλας. Τι παρατηρείτε; Επαναλάβετε το ίδιο όταν το ηλεκτροσκόπιο είναι φορτισμένο αρνητι-

κά. Προτείνετε υποθέσεις για την ερμηνεία αυτών των φαινομένων.

2. Πυκνωτής από αλουμινόχαρτο

Σας ζητούμε να φτιάξετε έναν πυκνωτή χρησιμοποιώντας αλουμινόχαρτο από ρολό αλουμινίου πλάτους 30 cm και χαρτί πάχους 0,1 mm. Να υπολογίσετε τη χωρητικότητά του. Θα χρειαστείτε ένα υποδεκάμετρο. Η διηλεκτρική σταθερά του χαρτιού είναι 4,5.



3. Ο μετρητής της ΔΕΗ

Στο σπίτι σας θα υπάρχει οπωσδήποτε ένας μετρητής ηλεκτρικής ενέργειας της ΔΕΗ. Ο μετρητής αυτός έχει ένα δίσκο ο οποίος περιστρέφεται όταν λειτουργεί μια οποιαδήποτε ηλεκτρική συσκευή. Δεχθείτε ότι η γωνία περιστροφής του δίσκου είναι ανάλογη με την καταναλισκόμενη ενέργεια.

α. Ανάψτε μόνο ένα λαμπτήρα του οποίου η ισχύς είναι γνωστή, 100W για παράδειγμα, και βεβαιωθείτε ότι είναι η μόνη συσκευή που λειτουργεί στο σπίτι σας. Με ένα ρολόι που μετράει δευτερόλεπτα, μετρήστε τον απαιτούμενο χρόνο για να κάνει ο δίσκος μια περιστροφή. Υπολογίστε επίσης την ενέργεια που καταναλώνει ο λαμπτήρας σ' αυτήν τη χρονική διάρκεια. Τα αποτελέσματα αυτά φανερώνουν κάποια αντιστοιχία ανάμεσα στον αριθμό περιστροφών του δίσκου και την καταναλισκόμενη ενέργεια. Συγκρίνετε αυτήν την αντιστοιχία με την αναγραφόμενη πάνω στο μετρητή της ΔΕΗ.

β. Σβήστε τον λαμπτήρα και πηγαίνετε να ανοίξετε την πόρτα του ψυγείου σας καθώς και το πορτάκι της κατάψυξης. Μετά από λίγο θα αντιληφθείτε ότι ο κινητήρας του ψυγείου σας μπαίνει σε λειτουργία. Επιστρέψετε στο μετρητή της ΔΕΗ και μετρήστε το

χρόνο που χρειάζεται για να κάνει ο δίσκος μια περιστροφή. Υπολογίστε την ενέργεια που καταναλώνει το ψυγείο όταν λειτουργεί ο κινητήρας του.

4. Ασφάλεια από ατσαλόμαλλο

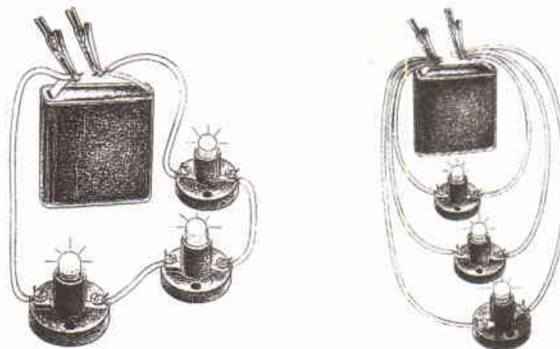
Συναρμολογούμε ένα κύκλωμα με τάση 6-8 V. Συνδέουμε σε σειρά διακόπτη, λαμπτήρα 6-8 V, μονωτικό στύλο, ατσαλόμαλλο, δεύτερο μονωτικό στύλο και αμπερόμετρο σε κλίμακα 0-3 A.

Κλείνουμε το διακόπτη και ο λαμπτήρας φωτοβολεί. Με ένα καλώδιο (μήκους 30 cm) με βύσματα βραχυκυκλώνουμε τους ακροδέκτες του λαμπτήρα ο οποίος παύει να φωτοβολεί. Η ένδειξη του αμπερομέτρου μεγαλώνει απότομα ενώ τούφα του ατσαλόμαλλου ερυθροπυρώνεται και καίγεται, λειτουργεί δηλαδή σαν ασφάλεια.

Το ατσαλόμαλλο είναι ένα λεπτό σύρμα με το οποίο τρίβουμε τις κατσαρόλες. Την τάση μπορούμε να τις πάρουμε είτε από το τροφοδοτικό είτε από ηλεκτρικές στήλες.

5. Δύο διαφορετικές συνδέσεις

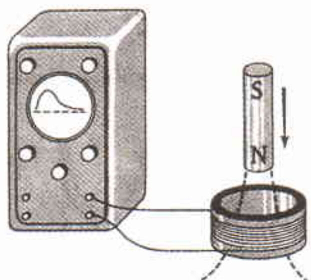
Πριν συναρμολογήσετε τα δύο κυκλώματα που παριστάνονται στο σχήμα να προβλέψετε «ποια από τα λαμπάκια θα ανάβουν πιο έντονα» και να δικαιολογήσετε την πρόβλεψή σας. Δοκιμάστε στη συνέχεια να κάνετε τις συνδέσεις έτσι ώστε τα έξι όμοια λαμπάκια να ανάβουν ταυτόχρονα. Τι διαπιστώνετε; Είχατε δίκιο; Οι δύο στήλες που θα χρησιμοποιήσετε να είναι όμοιες.



6. Αναζητώντας τον μαγνητικό μεσημβρινό

Σας ζητούμε να προσδιορίσετε τον μαγνητικό μεσημβρινό του σχολείου σας. Διαθέτετε μία μαγνητική βελόνα που μπορεί να στρέφε-

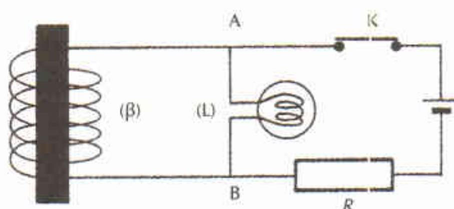
ται γύρω από κατακόρυφο άξονα και ένα νήμα της στάθμης. Να σχεδιάσετε πως θα το κάνετε και στη συνέχεια να το επιχειρήσετε και να αιτιολογήσετε τις ενέργειές σας.



7. Επαγωγή με σχετική κίνηση

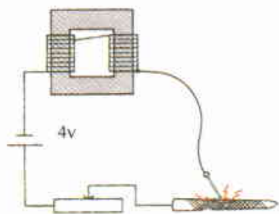
Διαθέτετε ένα πηνίο, ένα ισχυρό ραβδόμορφο μαγνήτη και τον παλμογράφο που υπάρχει στο σχολικό εργαστήριο. Συναρμολογήστε ένα κατάλληλο κύκλωμα –σαν αυτό που παριστάνεται στο σχήμα– με το οποίο θα μπορέσετε να διαπιστώσετε το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ασχοληθείτε με τη σχετική κίνηση μαγνήτη και πηνίου και καταγράψτε τα συμπεράσματα.

8. Αυτεπαγωγή



Επιδιώξτε να συναρμολογήσετε το κύκλωμα που παριστάνεται στο σχήμα με υλικό που υπάρχει στο σχολικό εργαστήριο. Ασχοληθείτε με το άνοιγμα και το κλείσιμο του διακόπτη και καταγράψτε τα σχετικά συμπεράσματα.

9. Η λίμα, το καρφί και οι σπινθήρες

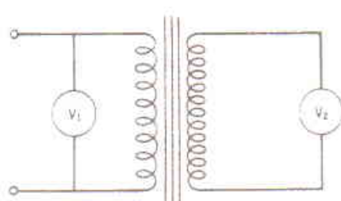


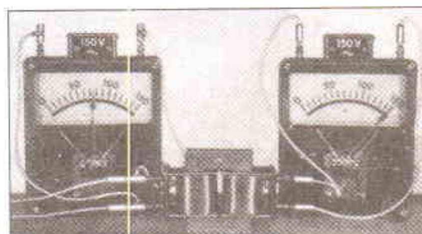
Συναρμολογούμε το κύκλωμα που παριστάνεται στο σχήμα. Χρειαζόμαστε μια πηγή συνεχούς ρεύματος, πηνίο με σιδηροπυρήνα, ροοστάτη, καλώδια, ένα καρφί και μία λίμα. Μετακινούμε το καρφί πάνω στη λίμα και βλέπουμε να δημιουργούνται σπινθήρες. Προσπαθήστε να δώσετε μια ερμηνεία στο φαινόμενο έστω και όχι απόλυτα ικανοποιητική.

10. Ο μετασχηματιστής και τα βολτόμετρα

α. Χρησιμοποιήστε τον μετασχηματιστή, δύο βολτόμετρα και τα σχετικά καλώδια για να συναρμολογήσετε ένα κύκλωμα όπως αυτό της φωτογραφίας. Θα χρειαστείτε βέβαια και την κατάλληλη τάση. Βασιζόμενοι στις ενδείξεις του βολτομέτρου να υπολογίσετε τον λόγο του μετασχηματισμού.

β. Ποιος είναι ο λόγος του μετασχηματισμού στην περίπτωση του μετασχηματιστή της φωτογραφίας; Το βολτόμετρο του πρωτεύοντος είναι αριστερά.





11. Ο μετασχηματιστής και ο παλμογράφος



α. Χρησιμοποιήστε τον μετασχηματιστή και τον παλμογράφο του σχολικού εργαστηρίου για να συναρμολογήσετε ένα κύκλωμα όπως αυτό που απεικονίζεται στη φωτογραφία. Αναζητήστε και την κατάλληλη τάση. Βασιζόμενοι στην αντίστοιχη εικόνα της οθόνης του παλμογράφου να υπολογίσετε τον λόγο του μετασχηματισμού.

β. Πόσος είναι ο λόγος του μετασχηματισμού στην περίπτωση του μετασχηματιστή της φωτογραφίας;

Θεωρήστε τον μετασχηματιστή ιδανικό.

Βιβλιογραφία

Εγχειρίδια διδασκαλίας

Amaldi E. και άλλοι, LA FISICA PER I LICEI SCIENTIFICI. εκδ. Zanichelli, Bologna 1984

Blatt E. PRINCIPLES OF PHYSICS Εκδ. Allyn and Bacon Inc. USA 1983.

Bottaro P. και άλλοι PHYSIQUE α) Classe de seconde β) Première S et E γ) Terminales S et E Εκδ. A. Colin Paris 1983.

Bramand P. και άλλοι PHYSIQUE α) Seconde εκδ. 1981 β) Première εκδ. 1982 γ) Terminales C et E εκδ. 1983. Εκδ. Hachette, Paris.

Bueche F. UNDERSTANDING THE WORD OF PHYSICS Εκδ. Mc Graw-Hill N. York, 1981.

Calvani P. και Maraviglia B. INTRODUZIONE ALLA FISICA (2ος τόμος)· Εκδ. Laterza, Roma-Bari 1982.

Collection A. Cros FONDEMENTS DE LA PHYSIQUE α) Seconde 1981 β) Première D, 1979 γ) Terminales CE, 1980, Εκδ. Belin, Paris.

Collection Hèbert PHYSIQUE α) Seconde, 1982 β) Première S/E, 1982 γ) Terminade D, 1983. Εκδ. Technique et Voulgavisation, Paris.

Collection «Libres Parcours» SCIENES PHYSIQUES 5e και 4e εκδ. Hachètte, Paris.

Fortuzzi Maria Giovanna NOZIONI DI FISICA Εκδ. Zanichelli, Bologna, 1984.

Fuller J. και Coates P. LIGHT ON PHYSICS Εκδ. Cambridge U.P. 1982.

Halliday D. και Resnick R. PHYSICS Εκδ. John Wiley and Sons, N. York 1966.

Holton G. και άλλοι HARVARD PROJECT PHYSICS COURSE (HPP). α) Στην Ιταλική έκδοση Unità 4. La luce et l' elettromagnetismo (1982). β) Στην Καναδέζικη γαλλόφωνη έκδοση Tome 4 La Lumière et l« electromagnetisme (1980).

Hewitt P. CONCEPTUAL PHYSICS Εκδ. Little, Brown and Company USA 1985.

Jardin Jim HIGHER PHYSICS Εκδ. Heinemann Educational Books, London 1983.

Riban D. INTRODUCTION TO PHYSICAL SCIENCE McGraw-Hill, New York 1982.

Serway R. και Faughn J. COLLEGE PHYSICS. Εκδ. Saunders College Publishing USA 1985.

Brodie D. PHYSICS. Oxford University Press U.K. 1996.

Fullick P. PHYSICS. Εκδ. Heinemann U.K. 1994.

Parsons S, Prichard PHYSICS. Εκδ. Collins Educational U.K. 1996

Dorling G. και άλλοι PHYSICS. Nuffield Coordinated Sicences U.K. 1994

Pople S., Whitehead P PHYSICS. Oxford University Press U.K. 1996

Μπουρούτης Ι. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΦΥΣΙΚΗΣ, επιμέλεια Σ. Μητσιάδη, ΟΕΔΒ Αθήνα

Ιστορία Επιστημών και Επιστημολογία

Asimov Isaac LIGHT, MAGNETISM AND ELECTRICTY. Εκδ. A. Mentor Book, USA 1966.

Bach Mc Master John, BENJAMIN FRANKLIN. Εκδ. Chelsea House, New York 1980

Bernal John, Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ, Τόμος Β, σε ελληνική μετάφραση του Ε. Μπιτσάκη, Εκδ. Ι. Ζαχαρόπουλος, Αθήνα 1983.

Dampier William A HISTORY OF SCIENE Cambridge U.P. , London 1979.

Daumas Maurice, HISTOIRE DE LA SCIENCE. Εκδ. Gallimard, Paris 1957.

Einstein A.-Infeld L. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΙΔΕΩΝ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ Μετάφρ. Ε. Μπιτσάκη εκδ. Δωδώνη, Αθήνα 1978.

Holton Gerald INTRODUCTION TO CONEPTS AND THEORIES IN PHYSICAL SCIENCE (Δεύτερη έκδοση με τη συμμετοχή και του B. Brush). Εκδ. Princeton U.P. New Jersey 1985.

Segrè Emilio FROM FALLING BODIES TO RADIO WAVES, Εκδ. W.H. Freeman and Company, New York 1984.

Taton René (sous la direction) LA SCIENE MODERNE DE 1450 A 1800. Εκδ. Presse Universitaires de France, Paris 1969.

Άρθρα

Κασσέτας Ανδρέας, «Ο δρόμος για τον ηλεκτρομαγνητισμό», Φυσικός κόσμος, τεύχος 73.

Κασσέτας Ανδρέας, «Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή», Φυσικός κόσμος, τεύχος 86.

Εγκυκλοπαιδικά

Basic Science. Εκδ. Marshall Cavendish Books 1984.

The encyclopedia of Science. Εκδ. Optimum books 1982.

Ο στίχος του Νίκου Καββαδία είναι από το ποίημα KURO SIWO.

Ο στίχος του Διονύσου Σαββόπουλου είναι από το «Ρεμπέτικο» της συλλογής «Δέκα χρόνια κομμάτια».

Τα σκίτσα της Μαφάλντα είναι του Quino παρμένα από την ελληνική έκδοση της Μαφάλντα στις Εκδόσεις Βαβέλ.

Το σκίτσο της πρώτης σελίδας του δεύτερου κεφαλαίου είναι του Αργεντινού σκιτσογράφου Mordillo.

Τα υπόλοιπα σκίτσα προέρχονται από πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Ορισμένες από τις φωτογραφίες, τα σχήματα και τις γκραβούρες προέρχονται από πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία.

Η μετάφραση του αποσπάσματος από το βιβλίο *Διαλέξεις του R. Feynman πάνω στη Φυσική* έγινε από τον Σταμάτη Μουρίκη.

Την ευθύνη για την τελική διαμόρφωση της γλώσσας όλων των κειμένων του βιβλίου φέρει ο Ανδρέας Κασσέτας.

Ευρετήριο

ΕΚΔΟΣΗ Α' 1998 - ΑΝΤΙΤΥΠΑ 173.000 - ΑΡ. ΣΥΜΒ. 2104/1-7-98
ΕΚΤΥΠΩΣΗ: ΚΛΑΔΗΣ ΧΑΡ. ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ: ΠΙ ΠΟΣ ΕΥΑΓ.